



Thème :

Optimisation et gestion de la consommation énergétique dans les complexes de production industriels intelligents évolutifs et philanthropique.

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master II en Architecture

« Spécialité : Architecture »

« Coloration : Environnement et technologie »

Préparé par : SEMMACHE Sassa

Dr. OUARET Manel	MCA	Département architecture de Bejaia	Président de jury
Dr. MOUHOUBI Nedjima	MCA	Département architecture de Bejaia	Rapporteur
Dr. HADJI Slimane	MCB	Département ATE de Bejaia	Rapporteur
Dr.AISSOU Said	MCA	Département ATE de Bejaia	Examineur
Mr.BOUKERARA Abed el Madjid		Ingénieur a l'unité de production d'énergie dCevital	Invité

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : SEMMACHE
Prénom : Sassa
Matricule : 202035056651
Spécialité et/ou Option : Environnement et technologie
Département : Architecture
Faculté : Technologie
Année universitaire : 2024/2025

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*): Master 2

Intitulé : Optimisation et gestion de la consommation énergétique dans les complexes de production industriels intelligents évolutifs et philanthropique

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
13/07/2025

Signature de l'intéressé

Lu et approuvé

.....

Résumé :

L'épuisement croissant des ressources naturelles utilisées pour la production énergétique constitue aujourd'hui une problématique majeure à l'échelle mondiale. Ce phénomène est particulièrement aggravé par la part prépondérante du secteur industriel, considéré comme l'un des plus grands consommateurs d'énergie et comme un acteur clé de la dégradation environnementale. Le recours massif aux énergies fossiles non renouvelables engendre des coûts environnementaux élevés et remet en question la viabilité des modèles de production actuels. Dans ce contexte, il devient impératif de repenser la manière dont les infrastructures industrielles sont conçues, organisées et gérées sur le plan énergétique.

C'est dans cette optique que s'inscrit notre recherche, qui porte sur la conception et l'optimisation énergétique des complexes de production industriels. Elle vise à étudier, sous divers angles, les moyens de faire évoluer ces infrastructures vers des modèles intelligents, autonomes et durables. Ce travail repose sur l'analyse des interactions entre l'architecture, les flux énergétiques et les performances environnementales, en intégrant à la fois des stratégies passives et des solutions actives. L'objectif fondamental est de proposer un nouveau modèle de complexe industriel alliant efficacité de production, sobriété énergétique et responsabilité écologique.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie rigoureuse a été mise en place, articulée en trois approches complémentaires. La première, documentaire et analytique, s'appuie sur l'étude de références scientifiques, de rapports techniques et d'exemples internationaux de complexes intelligents. Elle a permis d'identifier les principales tendances en matière d'optimisation énergétique et d'envisager leur adaptation au contexte algérien. La deuxième approche est comparative et repose sur des études de cas locales et étrangères, afin d'évaluer la pertinence des dispositifs technologiques, des systèmes de gestion intelligente et des choix architecturaux adoptés. Enfin, la troisième approche est projectuelle : elle consiste à développer une proposition de conception intégrée d'un complexe industriel intelligent, fondée sur l'usage combiné de matériaux bio sources, de solutions passives évolutives, de systèmes actifs performants et de technologies de pilotage intelligent.

Les résultats obtenus révèlent la nécessité de dépasser les modèles industriels conventionnels en intégrant, dès la phase de conception, une approche combinant une architecture bio-évolutive et un système technique intelligent. Cette approche repose sur une conception passive et évolutive dès la première phase, prenant en compte l'orientation, l'implantation et la topographie du site, ainsi que les dynamiques climatiques locales et les contraintes de production. L'analyse a mis en évidence le rôle déterminant de l'architecture dans la régulation des flux énergétiques, et montre que l'utilisation de matériaux auto-adaptatifs, couplée à une activité performante des équipements techniques et à des dispositifs architecturaux intelligents, permet de réduire significativement l'empreinte énergétique des complexes. En conclusion, cette recherche met en lumière le potentiel réel de concevoir des infrastructures industrielles plus sobres, résilientes et capables de répondre efficacement aux enjeux énergétiques et climatiques contemporains.

Les mots clés :

Optimisation énergétique – usine intelligente – architecture flexible – interopérabilité des systèmes – durabilité

Abstract

The increasing depletion of natural resources used for energy production is a major global issue. This problem is particularly exacerbated by the dominant role of the industrial sector, considered one of the largest energy consumers and a key contributor to environmental degradation. The massive reliance on non-renewable fossil fuels causes significant environmental costs and challenges the sustainability of current production models. In this context, it is imperative to rethink how industrial infrastructures are designed, organized, and managed in terms of energy.

Our research fits within this framework and focuses on the design and energy optimization of industrial production complexes. It aims to study, from various perspectives, ways to evolve these infrastructures toward intelligent, autonomous, and sustainable models. This work is based on the analysis of interactions between architecture, energy flows, and environmental performance, integrating both passive strategies and active solutions. The fundamental objective is to propose a new industrial complex model combining production efficiency, energy sobriety, and ecological responsibility.

To achieve these goals, a rigorous methodology was implemented, structured around three complementary approaches. The first, documentary and analytical, is based on the study of scientific references, technical reports, and international examples of smart complexes. It allowed the identification of main trends in energy optimization and their possible adaptation to the Algerian context. The second approach is comparative, relying on local and foreign case studies to evaluate the relevance of technological devices, intelligent management systems, and architectural choices made. Finally, the third approach is project-based: it involves developing an integrated design proposal for a smart industrial complex, based on the combined use of bio-based materials, evolving passive solutions, high-performance active systems, and intelligent control technologies.

The results reveal the need to go beyond conventional industrial models by integrating, from the design phase, an approach combining bio-evolutive architecture and intelligent technical systems. This approach relies on passive and evolving design from the outset, considering site orientation, layout, and topography, as well as local climatic dynamics and production constraints. The analysis highlighted the crucial role of architecture in regulating energy flows and showed that the use of self-adaptive materials, coupled with the efficient operation of technical equipment and intelligent architectural devices, significantly reduces the energy footprint of complexes. In conclusion, this research highlights the real potential to design industrial infrastructures that are more energy-efficient, resilient, and capable of effectively addressing contemporary energy and climate challenges.

Keywords:

Energy optimization – smart factory – flexible architecture – systems interoperability – sustainability

ملخص :

يشكل الاستنزاف المتزايد للموارد الطبيعية المستخدمة في إنتاج الطاقة مشكلة كبرى على المستوى العالمي. وتتفاقم هذه المشكلة بسبب الدور المهيمن للقطاع الصناعي، الذي يُعتبر من أكبر مستهلكي الطاقة ومساهماً رئيسياً في التدهور البيئي. إن الاعتماد

الكبير على الوقود الأحفوري غير المتجدد يؤدي إلى تكاليف بيئية عالية ويشكك في استدامة نماذج الإنتاج الحالية في هذا السياق، يصبح من الضروري إعادة التفكير في كيفية تصميم وتنظيم وإدارة البنى التحتية الصناعية

تأتي هذه الدراسة في هذا الإطار، وتركز على تصميم وتحسين كفاءة الطاقة في المجمعات الصناعية الإنتاجية. وتهدف إلى دراسة السبل المختلفة لتطوير هذه المنشآت نحو نماذج ذكية ومستقلة ومستدامة. يعتمد العمل على تحليل التفاعلات بين العمارة وتدفقات الطاقة والأداء البيئي، مع دمج استراتيجيات سلبية وحلول نشطة. الهدف الأساسي هو اقتراح نموذج جديد لمجمع صناعي يجمع بين كفاءة الإنتاج، الكفاءة الطاقية، والمسؤولية البيئية

لتحقيق هذه الأهداف، تم اعتماد منهجية صارمة تقوم على ثلاث مقاربات متكاملة. الأولى وثائقية وتحليلية، تستند إلى دراسة المراجع العلمية، والتقارير الفنية، وأمثلة دولية للمجمعات الذكية، مما مكن من تحديد الاتجاهات الرئيسية في تحسين الطاقة وإمكانية تكيفها مع السياق الجزائري. الثانية مقارنة، تعتمد على دراسات حالة محلية وعالمية لتقييم جدوى الأجهزة التكنولوجية، وأنظمة الإدارة الذكية، والخيارات المعمارية المعتمدة. وأخيراً، المقاربة الثالثة هي منهج تصميمي، تهدف إلى تطوير اقتراح تصميم متكامل لمجمع صناعي ذكي، يعتمد على الاستخدام المشترك للمواد البيولوجية، والحلول السلبية المتطورة، والأنظمة النشطة عالية الأداء، وتقنيات التحكم الذكية

تكشف النتائج عن ضرورة تجاوز النماذج الصناعية التقليدية من خلال دمج، منذ مرحلة التصميم، منهج يجمع بين العمارة البيو-تطورية والأنظمة التقنية الذكية. يعتمد هذا المنهج على تصميم سلمي ومتطور من البداية، يأخذ في الاعتبار توجيه الموقع، وتموضعه، وطبوغرافيته، بالإضافة إلى ديناميكيات المناخ المحلي وقيود الإنتاج. أبرز التحليل الدور الحاسم للعمارة في تنظيم تدفقات الطاقة، وأظهر أن استخدام المواد ذاتية التكيف، جنباً إلى جنب مع الأداء الفعال للمعدات التقنية والأجهزة المعمارية الذكية، يساهم في تقليل البصمة الطاقية للمجمعات بشكل كبير. في الختام، تسلط هذه الدراسة الضوء على الإمكانيات الحقيقية لتصميم بنى صناعية أكثر كفاءة ومرونة وقادرة على مواجهة تحديات الطاقة والمناخ الراهنة بشكل فعال

الكلمات المفتاحية:

تحسين الطاقة – مصنع ذكي – عمارة مرنة – تكامل الأنظمة – الاستدامة

REMERCIEMENTS :

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents. Mon père, Ma mère, c'est grâce à votre amour inconditionnel, votre soutien moral et votre abnégation que j'ai pu persévérer et avancer dans mon parcours universitaire. Merci infiniment. Mes pensées de gratitude s'adressent également à mes sœurs Merbouha, Amel, Sara, Salsabil, Saousen, Séline et Amira, ainsi qu'à l'ensemble de ma grande famille, mes grands-pères, mes oncles et mes tantes dont les encouragements et la bienveillance ont attisés ma motivation.

Je souhaite également remercier le département d'architecture de l'université de Bejaia, ainsi que l'ensemble des enseignants qui, sous leur tutelle, j'ai eu l'opportunité de forger mon savoir. Enfin, je tiens à remercier mes camarades de promotion avec qui j'ai eu l'occasion de partager ces années d'études et qui demeureront à jamais liés à ce beau chapitre de ma vie.

Tables des matières :

Résumé	I
Dédicace	III
Remerciements	IV
Table des matières	V
Liste des figures	XII
Liste des Tableaux	XVIII
Chapitre I : Chapitre introductif	01
1. Introduction générale	02
2. Problématique	04
3. Hypothèses de recherche	05
4. Objectifs de la recherche	06
5. Méthodologie de recherche	07
Chapitre II : Dissertation théorique	08
1. Introduction	09
2. Qu'est-ce qu'un complexe de production industriel	09
2.1 Contexte historique	10
2.2. Généralités et notions relatives au sujet	11
2.2.1 Composantes standards d'un complexe industriel	11
2.2.1.1 Infrastructure physique	11

2.2.1.2 Équipements.....	12
2.2.1.3 Ressources humaines.....	12
2.2.1.4 Systèmes de gestion.....	12
2.2.2 Processus de production au sein d'un complexe industriel.....	13
2.2.2.1. Chaîne de production.....	13
2.2.2.2. Flux, capacité de production et productivité	14
2.2.3 Typologies des complexes de production industriel.....	15
2.2.4. Implantation du complexe : choix crucial.....	17
2.2.4.1. Proximité des Matières Premières.....	17
2.2.4.2. Accès au marché.....	17
2.2.4.3. Disponibilité de la main d'œuvre qualifiée.....	18
2.2.4.4. Proximité des infrastructures de transport.....	18
2.2.4.5. Potentielles dépenses de production.....	18
2.2.4.6. Environnement réglementaire et fiscal.....	18
2.2.4.7. Qualité de vie et services auxiliaires.....	19
2.2.5 Organisation des complexes de production : un zonage fonctionnel.....	19
2.3. Enjeux et défis contemporains des complexes de production industriels.....	19
2.3.1 Défis environnementaux et écologiques	20
2.3.2 Enjeux socio-économiques.....	20

2.3.3. Une combinaison « philanthropie-technologie » comme remède ?.....	21
3. Smart building.....	22
3.1 Berceau, évolution & perspectives.....	22
3.2. Smart building en Industrie: Industrie 4.0.....	23
3.3. Les complexes de production industriels intelligents	24
3.3.1. Qu'est-ce qu'un complexe de production industrielle à l'ère de l'Industrie 4.0 ?.....	24
3.3.2. Notions relatives à l'industrie intelligente	24
3.3.2.1. Les usines intelligentes.....	24
3.3.2.2. Le complexe de production intelligent	24
3.3.2.3. L'intelligence dans les complexes de production industriels : échelles d'application.....	26
3.3.2.4. Quels moyens à déployer pour assurer un complexes industriels intelligents ?	27
4. Philanthropie : Flexibilité, Résilience & Durabilité Architecturale.....	29
4.1. Philanthropie.....	29
4.2. L'architecture Flexible.....	31
4.2.1. Origines de la typologie	32
4.2.2. La flexibilité en théorie	35
4.2.2.1. Les mécanismes directifs/ déterminés.....	37
4.2.2.2. Les mécanismes ouverts/ indéterminés	38

4.3. Les dispositifs de résilience	40
4.3.1. La modularité spatiale.....	40
4.3.2. Le plan libre.....	41
4.3.3. Les parois amovibles.....	42
4.3.4. Les espaces multi-vocationnels.....	44
4.3.5. La double hauteur.....	47
4.4. Synthèse : Architecture Flexible : Avantages, défis et enjeux.....	49
5. Gestion de la consommation énergétique dans les complexes de production intelligents	50
5.1. C'est quoi l'énergie	50
5.1.1. Différents types d'énergie.....	50
5.1.2. Sources d'énergie.....	51
5.1.3. Formes d'énergie.....	51
5.2. Notions clés.....	52
5.2.1. Procédées de transformation énergétique : trigénération et hydrogène bas carbone.....	52
5.2.2. Complexes de production intelligent : quelles énergies ?.....	53
5.3. Gestion des consommations énergétiques au sein des complexes de production intelligents.....	53
5.3.1. Energy Management System (EMS).....	54
5.3.2. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).....	54
5.3.3. GTC/GTB (Gestion Technique Centralisée / Gestion Technique du Bâtiment).....	55
5.3.4. Smart meters et capteurs IoT.....	55
5.3.5. Tableaux de bord énergétiques (Energy Dashboards).....	55

5.4. L'optimisation des consommations énergétiques au sein des complexes de production intelligent.....	55
5.4.1. Systèmes de régulation et d'automatisation industrielle (Automates PLC / DCS).....	56
5.4.2. Logiciels d'optimisation énergétique.....	56
5.4.3. Systèmes de gestion de la demande (Demand Side Management – DSM).....	56
5.4.4. Stockage d'énergie et pilotage de la flexibilité.....	57
5.4.5. Smart Grids et systèmes de gestion d'énergies renouvelables intégrées.....	57
5.4.6. Maintenance prédictive et supervision via Intelligence Artificielle.....	57
5.5. Amélioration des performances énergétiques à travers les dispositifs architecturaux.....	57
6. Conclusion.....	62
Chapitre III : Corpus d'étude.....	64
1. Introduction.....	65
1.1. Grille d'Analyse.....	66
1.2. Observation (In-Situ).....	66
1.3. Entretiens oraux.....	66
1.4. Simulation numérique.....	66
2. Analyse de cas concrets.....	67
2.1. La Smart Factory de Future Stitch.....	68
2.1.1. Présentation générale	68
2.2. Trumpf Hungary Smart Factory / Barkow Leibinger.....	73
2.2.1. Présentation générale.....	73

2.3. TRUMPF Smart Factory Chicago	77
2.3.1 Présentation générale.....	78
2.4. Schneider Electric smart factory.....	81
2.5. Siemens Electronics Works	83
2.6. Usine de Bosch.....	84
3. Conclusion : synthèse de l'analyse des exemples.....	86
Chapitre IV : Cas d'étude : Complexe de Production Industriel Agroalimentaire	
« Cevital ».....	88
1. Introduction	89
2.Présentation du complexe.....	89
3.Implantation Stratégique.....	89
4.Evolution du complexe de Production	89
5.Analyse architecturale : problématique spatiale.....	90
6. Fonctionnement énergétique du complexe.....	91
7. Conclusion.....	94
8. Simulation Energétique sur le cas d'étude.....	95
Chapitre V : Analyse du site d'intervention.....	100
1. Le site d'intervention : Présentation et critères du choix	101
2.Limites, Accessibilité et Repères.....	101
3.Typologies de Bati Existant.....	102
4. Allure urbaine.....	103
5.Caractéristiques Physiques de site.....	104
5.1. Ensoleillement.....	104

5.2. Eclaircement.....	105
5.3. Les vents dominants.....	105
5.4. L'humidité.....	106
6. Synthèse : Grille d'analyse SWOT.....	106
7. Analyse complémentaire	108
7.1. Analyse de l'Usine de Balsan <i>"le précurseur de la révolution industrielle"</i>	109
7.1.1. Genèse Historique.....	109
7.1.2. Organisation et fonctionnement spatial de l'usine.....	110
7.1.3. Aspect énergétique.....	113
7.1.4. Schéma de structure d'organisation d'usine.....	114
7.2. Analyse de complexe de production de textile ICOTAL.....	115
7.2.1. Organisation et fonctionnement spatial.....	115
7.2.2. Matériaux de construction.....	118
7.2.3. Aspect énergétique technologique.....	118
Chapitre VI : Conclusion générale.....	119
Conclusion générale.....	120
Chapitre VII : Annexe.....	123
Projet de fin d'étude.....	124
VIII.Bibliographie.....	132

Liste des figures :

Figure 1 : Disposition typique des temples Bouddhistes, source : http://mpzga.free.fr	33
Figure 2: La maison traditionnelle Japonaise Minka, source : http://mpzga.free.fr	34
Figure 3: illustration intérieure de la villa katsura, Kyoto, Japon, source : kanpai.fr	35
Figure 4: La herencia de coderch, source : dximagazine.com	38
Figure 5: La maison domino de Le Corbusier, source : https://cdn.essentiels.bnf.fr	39
Figure 6: prototype d'une conception modulaire, source : maquetasarquitectonicas.es	40
Figure 7: Photographie du projet Lona, source : sophie-delhay-architecte.fr	46
Figure 8 : Exploitation des grandes baies dans une conception en double hauteur, source : leparisien.fr	46
Figure 9 : Différentes possibilités d'appropriation des espaces de logements proposés par l'architecte, source : sophie-delhay-architecte.fr	46
Figure 10 : Prototype d'une conception en double hauteur, source : leparisien.fr	47
Figure 11 : Exploitation des grandes baies dans une conception en double hauteur, source : leparisien.fr	48
Figure 12 : Schéma explicatif du déroulement du chapitre, source : <i>traitement personnel</i>	65
Figure 13 : Illustration de la smart factory de Future Stitch, source : archello.com	68
Figure 14 : Schéma montrant le zonage fonctionnel de l'équipement, source : <i>Traitement personnel via le logiciel ArchiCad</i>	69
Figure 15 : Schéma montrant le zonage fonctionnel de l'équipement, source : <i>Traitement personnel via le logiciel ArchiCad</i>	69
Figure 16 : les grottes de Maiji Shan en Chine, source : nationalgeographic.fr	70
Figure 17 : Les escaliers extérieurs du Future Stitch , source : archdaily.com	70
Figure 18 : Schéma des circuits régissant l'équipement de Future Stitch, source : archdaily.com & <i>traitement personnel</i>	70
Figure 19 : Schéma des systèmes d'évacuation de l'équipement, source : archdaily.com	71

Figure 20 : Schéma structurel modulaire de l'équipement de Future Stitch, <i>source : archdaily.com & traitement personnel</i>	71
Figure 21 : Façade nord de l'équipement, <i>source : archdaily.com</i>	72
Figure 22 : Façade Ouest de l'équipement, <i>source : archdaily.com</i>	72
Figure 23 : Façade Est de l'équipement, <i>source : archdaily.com</i>	72
Figure 24 : Façade Sud de l'équipement, <i>source : archdaily.com</i>	72
Figure 25 : Illustration de la Trumpf Hungary, smart factory, <i>source : c3globe.com</i>	73
Figure 26 : Zonage fonctionnel de la Trumpf Hungary smart factory <i>source : archdaily.com</i>	74
Figure 27 : plan des circuits du RDC et des étages de la Trumpf Hungary smart factory, <i>source : archdaily.com & traitement personnel</i>	75
Figure 28 : Vue rapprochée sur le revêtement composite des façades et sur la toiture de la smart factory de Trumpf Hungary, <i>source : archello.com</i>	75
Figure 29 : Vue rapprochée sur le revêtement composite des façades et sur la toiture de la smart factory de Trumpf Hungary, <i>source : archello.com</i>	75
Figure 30 : Illustration montrant la disposition intérieure de l'ossature, <i>source : archdaily.com & traitement personnel</i>	76
Figure 31 : Illustration démontrant le principe d'exposition des façades, <i>source : archdaily.com & traitement personnel</i>	77
Figure 32 : Illustration de la façade de la smart factory de Trumpf à Chicago, <i>source : archdaily.com</i>	77
Figure 33 : schéma illustrant les principes préconisés par la smart factory de Trumpf à Chicago, <i>source : Générée par l'IA</i>	78
Figure 34 : illustration du principe de zonage fonctionnel dans la smart factory de Trumpf à Chicago, <i>source : Traitement personnel par le logiciel ArchiCad</i>	79
Figure 35 : illustration du principe de zonage fonctionnel dans la smart factory de Trumpf à Chicago, <i>source : Traitement personnel par le logiciel ArchiCad</i>	79
Figure 36 : illustration montrant les aires de circulation assurant la liaison entre les deux volumes de la smart factory de Trumpf à Chicago, <i>source : ArchDaily.com</i>	79
Figure 37 : illustration montrant les aires de circulation assurant la liaison entre les deux volumes de la smart factory de Trumpf à Chicago, <i>source : ArchDaily.com</i>	79

Figure 38 : illustration de l’enveloppe extérieure de Schneider Electric smart factory, <i>source : lefigaro.fr</i>	81
Figure 39 : Schéma décrivant le fonctionnement de la plateforme Ecostruxure, responsable de la gestion énergétique au sein de Schneider Electric smart factory, <i>source : cm3inc.com</i>	83
Figure 40 : Image montrant l’enveloppe extérieure de l’usine de Siemens Electronic works, <i>source : siemens.com</i>	83
Figure 41 : Image de la façade principale de l’usine de Bosch, <i>source : bosch.fr</i>	85
Figure 42 : Schéma montrant le principe de digitalisation de l’usine Bosch, <i>source : Traitement personnel</i>	86
Figure 43 : Carte illustrant l’évolution spatiale du complexe de Cevital, <i>source : Carte personnelle</i>	91
Figure 44 : Schéma illustrant le fonctionnement énergétique du complexe de Cevital, <i>source : Traitement personnel</i>	91
Figure 45 : Diagramme illustrant les consommations en eau de forage du complexe de Cevital pendant l’année 2014, <i>source : diagramme personnel</i>	93
Figure 46 : Diagramme illustrant les consommations en eau d’osmose du complexe de Cevital pendant l’année 2014, <i>source : diagramme personnel</i>	93
Figure 47 : Schéma illustrant le cycle d’eau au sein du complexe de Cevital, <i>source : Traitement personnel</i>	93
Figure 48 : Diagramme relatif aux besoins de chauffage et refroidissement du cas d’étude, <i>source : Archiwizard</i>	96
Figure 49 : Diagramme relatif à la température de l’air du cas d’étude, <i>source : Archiwizard</i>	96
Figure 50 : Prise révélant les conditions thermiques du cas d’étude, <i>source : ArchiWizard</i>	96
Figure 51 : Prise révélant les conditions thermiques du cas d’étude, <i>source : ArchiWizard</i>	96
Figure 52 : Prise révélant les conditions thermiques du cas d’étude, <i>source : ArchiWizard</i>	97
Figure 53 : Carte révélant le degré d’éclairement et du facteur de lumière de jour au sein du cas d’étude, <i>source : ArchiWizard</i>	97
Figure 54 : Carte révélant le degré d’éclairement et du facteur de lumière de jour au sein du cas d’étude, <i>source : ArchiWizard</i>	97

Figure 55 : Diagramme relatif aux besoins de chauffage et refroidissement dans le cadre du deuxième scénario, <i>source : Archiwizard</i>	98
Figure 56 : Diagramme relatif à la température de l'air du cas d'étude dans le cadre du deuxième scénario, <i>source : Archiwizard</i>	98
Figure 57 : Prise illustrant les conditions thermiques sur les façades du cas d'étude dans le cadre du deuxième scénario, <i>source : ArchiWizard</i>	99
Figure 58 : Prise illustrant les conditions thermiques sur les façades du cas d'étude dans le cadre du deuxième scénario, <i>source : ArchiWizard</i>	99
Figure 59 : Carte illustrant la situation du site d'intervention, <i>source : Carte extraite du PDAU intercommunal</i>	101
Figure 60 : Carte illustrant les limites, l'accessibilité et les repères notables du site d'intervention, <i>source : Carte traité par le logiciel AutoCad</i>	102
Figure 61 : Carte illustrant les différentes typologies de construction autour du site d'intervention, <i>source : Carte traité par le logiciel AutoCad</i>	102
Figure 62 : Coupe schématique transversale du site d'intervention, <i>source : Traitement personnel</i>	103
Figure 63 : Coupe schématique longitudinale du site d'intervention, <i>source : Traitement personnel</i>	103
Figure 64 : Illustration montrant les façades des immeubles avoisinant le site d'intervention, <i>source : photos prises le 05/04/2025</i>	104
Figure 65 : Illustration montrant les façades des immeubles avoisinant le site d'intervention, <i>source : photos prises le 05/04/2025</i>	104
Figure 66 : Illustration montrant les façades des immeubles avoisinant le site d'intervention, <i>source : photos prises le 05/04/2025</i>	104
Figure 67 : Simulation d'ensoleillement durant la saison d'hiver, <i>source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard</i>	104
Figure 68 : Simulation d'ensoleillement durant la saison du printemps, <i>source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard</i>	104
Figure 69 : Simulation d'ensoleillement durant la saison d'été, <i>source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard</i>	104

Figure 70 : Simulation d'ensoleillement durant la saison d'automne, <i>source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard</i>	104
Figure 71 : Simulation de l'éclairement, <i>source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard</i>	105
Figure 72 : Simulation du comportement du vent venant du Nord, <i>source : Cartes traitées avec le logiciel ArchiWizard</i>	105
Figure 73 : Simulation du comportement du vent venant du Sud, <i>source : Cartes traitées avec le logiciel ArchiWizard</i>	105
Figure 74 : Simulation du comportement du vent venant du côté Est, <i>source : Cartes traitées avec le logiciel ArchiWizard</i>	105
Figure 75 : Simulation du comportement du vent venant du côté Ouest, <i>source : Cartes traitées avec le logiciel ArchiWizard</i>	105
Figure 76 : Simulation du facteur de l'humidité, <i>source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard</i>	106
Figure 77 : Carte synthétisant les divers facteurs climatiques influant le site d'intervention, <i>source : Traitement personnel par le logiciel SketchUp</i>	106
Figure 78 : Illustration de l'usine de Balsan , <i>source : museedelachemiserie.fr</i>	109
Figure 79 : Schéma de l'évolution de l'usine de Balsan, <i>source : Traitement personnel</i>	110
Figure 80 : Schéma fonctionnel de l'usine de Balsan, <i>source : Traitement personnel</i>	111
Figure 81 : Schéma démontrant les différents compartiments composant l'usine de Balsan, <i>source : amsi-balsan-asso.fr</i>	112
Figure 82 : Vue sur la structure métallique de l'usine Balsan, <i>source : bridgemanimages.com</i>	113
Figure 83 : Vue sur les ateliers montrant la pénétration de la lumière naturelle à travers des systèmes de sheds dans l'usine Balsan, <i>source : bridgemanimages.com</i>	113
Figure 84 : Vue de la salle des chaudières de l'usine Balsan, <i>source : bridgemanimages.com</i>	114
Figure 85 : Schéma démontrant le fonctionnement global de l'usine Balsan, <i>source : Traitement personnel</i>	114

Figure 86 : Plan de masse de l'usine ICOTAL, <i>source : Carte personnelle</i>	115
Figure 87 : Perspective 3D de l'usine ICOTAL, <i>source : image personnelle</i>	115
Figure 88 : Schéma démontrant le fonctionnement de l'usine ICOTAL, <i>source : Traitement personnel</i>	116
Figure 89 : image montrant le système structurel et de cloisonnement de l'usine ICOTAL, <i>source : Photo prise le 08/01/2025</i>	117
Figure 90 : image montrant le système de sheds Américain adopté dans l'usine ICOTAL, <i>source : Photo prise le 08/01/2025</i>	117
Figure 91 : Carte montrant la stratégie urbanistique règlementaire adoptée, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Autocad</i>	124
Figure 92 : Carte montrant la stratégie de ségrégation adoptée, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Autocad</i>	124
Figure 93 : Carte et diagramme montrant la stratégie d'homothétie adoptée, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD</i>	125
Figure 94 : Carte et diagramme montrant la stratégie d'homothétie adoptée, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD</i>	125
Figure 95 : Plan d'aménagement du rez de chaussée de l'entité de production, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD</i>	126
Figure 96 : Scénario de réaménagement n°01 préposant une extension horizontale, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD</i>	126
Figure 97 : Scénario de réaménagement n°02 préposant une extension verticale, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD</i>	127
Figure 98 : Image synthèse 3D du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion</i>	127
Figure 99 : Image synthèse 3D du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion</i>	127

Figure 100 : Image synthèse 3D du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion</i>	127
Figure 101 : Image synthèse 3D du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion</i>	127
Figure 102 : Image synthèse 3D du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion</i>	128
Figure 103 : Image synthèse 3D du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion</i>	128
Figure 104 : Image synthèse 3D du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion</i>	128
Figure 105 : Image synthèse 3D du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion</i>	128
Figure 106 : Résultats relatifs à la simulation des apports solaires et internes au sein du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiWizard</i>	129
Figure 107 : Résultats relatifs à la simulation des besoins de chauffage et de refroidissement, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiWizard</i>	129
Figure 108 : Résultats relatifs à la simulation des températures opératives au sein du projet, <i>source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiWizard</i>	129
Figure 109 : Résultats relatifs à la simulation thermique des façades du projet, <i>source :</i> <i>Traitement personnel avec le logiciel ArchiWizard</i>	130
Figure 110 : Résultats relatifs à la simulation thermique des façades du projet, <i>source :</i> <i>Traitement personnel avec le logiciel ArchiWizard</i>	130
Figure 111 : Résultats relatifs à la simulation thermique des façades du projet, <i>source :</i> <i>Traitement personnel avec le logiciel ArchiWizard</i>	130

Liste des tableaux :

Tableau 01 : Synthèse des différentes typologies de complexes de production, <i>source : Traitement personnel</i>	18
Tableau 02 : Fonctionnement digitale de Schneider Electric smart factory, <i>source : Traitement personnel</i>	83
Tableau 03 : Démonstration des différents niveaux de digitalisation de l'usine de Siemens Electronic works, <i>source : Traitement personnel</i>	85
Tableau 04 : Synthèse de l'analyse des exemples, <i>source : Traitement personnel</i>	86
Tableau 05 : Synthèse de l'analyse SWOT, <i>source : Traitement personnel</i>	101
Tableau 06 : Programme surfacique de l'usine ICOTAL, <i>source : Traitement personnel</i>	115

Chapitre I :
Chapitre introductif

1. Introduction Générale :

L'énergie constitue une ressource indispensable au fonctionnement de nos sociétés modernes et alimente une large gamme de secteurs économiques diversifiés. En effet, la consommation et la dissipation de l'énergie furent, depuis l'aube des temps, le moteur essentiel du développement humain : « *Rien ne se passe sans dissipation de l'énergie* » (mignerot, 17 octobre 2019)

Notamment, de nos jours, à travers les extractions massives des ressources naturelles, principalement appartenant à la famille des hydrocarbures, à l'égard desquelles nous dépendons étroitement, selon le rapport de « BP Statistical Review of World Energy 2017 » qui estime la consommation d'énergie fossile en termes de quantité dépassant par le décuple la quantité de la consommation énergétique relative à tous types d'énergies renouvelables combinés. Cette surexploitation entraîne des conséquences alarmantes sur l'environnement, incitant de nombreux scientifiques à tirer la sonnette d'alarme quant à l'avenir de notre planète. En effet, « *Le pic de Hubbert* », un théorème élaboré par Marion King Hubbert, spécialiste connu du champ géologique lors du siècle précédent, illustre le fait que les ressources de la planète prennent inéluctablement la voie de l'épuisement (Younici Karima, 2018)

Dans ce contexte, le secteur industriel, en tant que plus grand consommateur d'énergie, et plus particulièrement les complexes de production, sont désignés comme les principaux responsables, en accumulant divers types de consommation énergétique, entre autres les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), Les énergies thermiques (chauffage, fusion, transformation des matériaux), Les énergies électriques (alimentation des machines, équipements de production, éclairage). (International Energy Agency (IEA), 2023) Les caractéristiques inhérentes à ces institutions industrielles attirent d'autres détracteurs acharnés, en l'occurrence ceux des militants écologistes s'indignant des impacts néfastes de ces établissements. Effectivement, les émissions des gaz à effet de serre ainsi que leurs innombrables autres types de résidus provoquent une dégradation progressive de l'écosystème.

En effet, en moyenne 65% des émissions de gaz de CO₂ à travers le monde sont imputable à l'industrie et le secteur de l'énergie. Ces mêmes statistiques révèlent une tendance à la hausse de ces émissions de gaz à effet de serre au cours des années précédentes : en 2021, on a marqué

une hausse de 4,2 % par rapport aux données de l'année auparavant et de 0,5% vis-à-vis de 2019, l'état d'augmentation perdue en 2022 avec une exacerbation de 1,4%. (*International Energy Agency (IEA), 2023*)

Cette conjecture avait suscité, lors de la dernière décennie, l'essor d'une terminologie « effondriste » dans les milieux scientifiques ainsi que dans une grande partie de la presse pour qualifier ces risques écologiques autant qu'économiques et politiques. Un changement brutal de situation semble craint par beaucoup d'analystes, qui semblent penser que nous devons désormais anticiper un avenir, dans tous les cas, de plus en plus contrariant. D'innombrables chercheurs, entre autres on citera Vincent Mignerot, Bill McKibben, Pablo Servigne et Kate Raworth, ainsi que les hautes instances gouvernementales au monde, en guise de tentative de résolution, promulguèrent et instauraient divers programmes destinés à assurer ce qu'on appelle « Transition énergétique ». Travestir les pratiques énergétiques et plus précisément les habitudes industrielles à travers la préconisation de nouvelles méthodes, à effets écologiques minimes, servant à générer les énergies motrices semble être l'objectif escompté. Un rapport du conseil mondial de l'Energie (CME) dit : « *Les systèmes énergétiques mondiaux ont atteint un seuil critique, et les choix que nous faisons aujourd'hui auront des répercussions significatives sur nos modes de vie pour les décennies à venir* ». Le projet du « Green Deal » Européen, présenté par Ursula Van Der Leyen, présidente de la Commission européenne au sein de l'UE, visant à rendre l'Europe climatiquement neutre d'ici 2050, avec des objectifs intermédiaires pour 2030, (*Commission Européenne, 2019*) ainsi que la stratégie Allemande « EnergieWende » axée sur la réduction de la dépendance du pays aux combustibles fossiles et à augmenter la part des énergies renouvelables (*(BMWK), s.d*) ; sont des spécimens de diverses stratégies adoptées à travers le monde.

L'Algérie de son côté, est l'un des précurseurs Africains vantant à une transition énergétique. Au sillage de sommet de Johannesburg (Afrique de Sud) en 2002, l'Algérie avait procédé à la l'adaptation de son cadre législatif et réglementaire à ces enjeux contemporains notamment dans le secteur industriel ; ceci en promulguant des lois relatives à la promotion des énergies renouvelables et à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, aux conditions de création des villes nouvelles et de leur aménagement, ...etc. (*Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire, 2025*)

2. Problématique :

Entre complexes de production et usines conventionnelles, bâties à la postindépendance et établissement industriels adoptant les concepts de développement durable conformément aux prescriptions gouvernementales de 2002, l'Algérie détient une large gamme de potentiel industriel. La consommation énergétique de ce secteur est estimée aux environs 15Mtoe en 2019, d'après le rapport APRUE 2019, ce qui représente presque 22% approximativement de la consommation énergétique globale du secteur bâti en Algérie.

Ces statistiques ne sont pas anodines. En effet, elles mettent la lumière sur deux potentielles hypothèses relatives aux débouchés de la stratégie algérienne de développement durable, l'une est l'inefficacité de la stratégie et l'autre est son insuffisance, ou pour ainsi dire manque de responsivité. Face à cette hypothèse qui s'avère de plus en plus réelle, et étant impossible de se sevrer des complexes industriels vu leurs prépondérances dans la composante économique, le pays devra identifier de nouvelles voies dotées davantage de responsivité inhérente face à ces enjeux cruciaux.

L'essor technologique des dernières décennies a ouvert des perspectives prometteuses pour relever les enjeux auxquels sont confrontés les complexes de production industriels. Des progrès accomplis dans plusieurs domaines entre autres informatique, automatique, intelligence artificielle, ...etc nous procurent la munition aspirée pour y amorcer de nouvelles pratiques industrielles plus philanthropiques et durables. Dès lors, c'est ici que demeure la ligne de mire que nous devons préconiser dans nos recherches présentes et ultérieures : une transition énergétique étayée par l'exploitation de systèmes High-tech fonctionnant synergiquement, faisant office de moyens de secours rompant avec les anciennes mœurs industrielles des complexes de production, afin d'ériger de nouvelles institutions industrielles urbaines résilientes dotées d'une performance énergétique optimal ; attrayantes à l'égard de la société profane par une austérité bénéfique et un impact écologique infime.

Dans ce contexte, une question cruciale s'impose : comment intégrer des dispositifs et des systèmes innovants pour optimiser la consommation énergétique dans les complexes industriels ?

Cette problématique fait appel à des question secondaires qui peuvent s'articuler comme suit :

- Etant relativement paradoxaux, quelles solutions permettent de concilier efficacité industrielle et philanthropie dans une perspective durable ?
- En quelles mesures, ces complexes intelligents, puissent-ils garantir une économie dans le cadre de couts de production ?
- Quels sont les avantages à préconiser et les inconvénients à extirper de la gestion de la consommation énergétique intelligente vis-à-vis des méthodes d'approvisionnement conventionnelles locale dans les complexes de production ?
- Quels sont les moyens d'assurer la résilience et la durabilité de ces complexes face aux fluctuations économiques, politiques et sociales ?
- Faisant face à une notion nouvelle, comment aborder la mission d'inculquer aux différentes classes sociales cette culture de résilience et de durabilité qui résultera un fourmillement de ces complexes de production intelligents ?

3. Hypothèses de recherche

Sur la base de données qu'on détient à ce point de la recherche, consolidée par des notions pré requises, nous allons nous engager dans une tentative anticipée de réponse aux précédents questionnements.

L'optimisation de la performance énergétique pourra être atteinte en faisant agir synergiquement l'ensemble des différents flux circulant dans un corps de bâtiment (électricité, gaz, eau, internet, ...etc.) ; pour mieux dire, l'optimisation de la performance énergétique passe par l'interopérabilité des systèmes.

L'architecture évolutive et flexible est susceptible de constituer un levier clé sur le plan architectural. De par ces caractéristiques, elle pourra solver un inconvénient récurrent dans ce type de conception, à savoir la transition entre entités massives, englobant les ateliers et espaces de production, et entités légères, contenant les zones dédiées aux pratiques salubres telles que les espaces communautaires, résidentiels et de consommation. Une architecture flexible, se manifestant sous la forme de zones tampons aménagées, atténuera les effets polluants et anticipera que ceux-ci transitent entre ces deux macro-entités du complexe. En outre, dans un

contexte industriel en évolution constante, assurer l'adaptabilité et la pérennité de l'environnement bâti demeure un enjeu primordial. Un enjeu à lequel répond efficacement l'architecture flexible à travers ces diverses approches, en l'occurrence le recours à la modularité structurelle, l'usage du plan libre, l'adoption d'éléments architecturaux adaptables tels que les parois amovibles, pliables ou rétractables, ainsi que l'exploitation multifonctionnelle des espaces.

Ces solutions apportées représentent des éléments relativement nouveaux dans le milieu social local. Les circonstances politico-économiques ont entravé la divulgation de ces savoir-faire à travers nos habitudes architecturales et pratiques industrielles ; l'inculquer graduellement à travers l'exposition des effets bénéfiques de ces pratiques dans des projets concrets semble comme une option, néanmoins on ne pourra s'en priver d'un travail mené par des experts dans des domaines tels que la sociologie, la psychologie, ...etc.

4. Objectifs de la recherche :

Fondée sur la base de la problématique ci-dessus, et à partir des hypothèses formulées, cette recherche explorera la notion des complexes de production dans toutes ces facettes. Afin de mieux manier la thématique, la recherche sera démantelée en trois tronçons. Au bout de chacune de ces phases réciproquement liées, on parviendra à atteindre des objectifs spécifiques qui nous permettront d'aborder la prochaine. Ces objectifs peuvent être classifiés en trois grandes branches comme suit : comprendre puis analyser et enfin appliquer. Donc, à travers la partie initiale, visant la compréhension et l'assimilation des notions occultées de la thématique, on cherchera à identifier les caractéristiques des complexes de production conventionnels et intelligents, à étudier les notions relatives aux consommations et flux énergétiques au sein des infrastructures industrielles, ainsi qu'à discerner les potentielles influences réciproques entre l'architecture et les performances énergétiques. La seconde phase de la recherche, qui sera caractérisée par une propension analytique, a pour objectifs l'évaluation des solutions apportées dans des complexes industriels intelligents situés dans différents contextes et d'estimer leur faisabilité dans le contexte Algérien, ainsi qu'à étudier les impacts de ces diverses remèdes « intelligents » sur la consommation énergétique et les performances industrielles. A l'issue de la recherche l'objectif ultime demeure de parvenir à proposer une conception moderne et durable

d'un complexe de production intelligent, alliant efficacité industrielle et responsabilité environnementale.

5. Méthodologie de recherche :

Le traitement d'une telle problématique, qui présente des aspects complexes et multidimensionnels, nécessite l'adoption d'une approche méthodologique rigoureuse alliant :

- Une recherche documentaire approfondie qui, en s'étayant sur l'analyse d'un ensemble d'échantillons fiables composé de thèses de recherche, d'articles scientifiques, de rapports spécialisés ainsi que des revues académiques, va nous procurer différentes perspectives issues de divers domaines scientifiques.
- Une collecte minutieuse de données quantitatives et qualitatives relatives aux pratiques énergétiques dans les complexes industriels en Algérie et à travers le monde, ainsi qu'aux tendances en matière d'optimisation et de gestion des consommations énergétiques.
- Une étude de cas portant sur un ensemble de complexes industriels intelligents de production locaux et internationaux, qui aura pour objectif de cerner les exigences fondamentales de ces infrastructures et de mettre en exergue les techniques et les configurations d'ordre architecturales, technologiques et énergétiques adoptées.
- Une observation sur terrain, assurant une assimilation plus approfondie des données que présente notre cas d'étude, consolidée par le recours à une documentation photographique qui permettra de rendre compte de l'état des lieux. Afin de compléter cette démarche, on va établir une synthèse fondée sur une analyse SWOT dans laquelle seront identifiés les forces, faiblesses, opportunités et menaces du modèle étudié.
- Des simulations énergétiques à travers des logiciels spécialisés, permettant d'évaluer l'efficacité des solutions proposées.

Chapitre II :

Dissertation théorique

1. Introduction :

Le thème, comme on l'avait souligné précédemment, est assez ambigu présentant plusieurs points obscurs. Cette partie donc, constituée d'une dissertation théorique colossale, servira à ériger des idées plus lucides sur le champ des complexes de production intelligents. L'entame du chapitre est consacrée à une présentation générique des notions qui leur sont relatives dans les deux contextes, Algérien et international, avant de se projeter sur les enjeux et les défis à lesquels sont confrontées ces infrastructures. Ensuite, après avoir énumérer les solutions qu'on devra préconiser, nous allons effectuer une présentation détaillée de chacune de ces solutions, évoquant leur historique et éclosion, état de l'art, tendances et perspectives. Enfin, la recherche évoquera les consommations énergétiques et la contribution attendue par les solutions proposées afin de parvenir à l'optimisation escomptée.

Ce chapitre, donc, est subdivisé en trois contingents principaux. Une entame contenant une présentation générique du thème, une partie charnière évoquant les enjeux et les potentielles solutions des problématiques sur lesquelles se heurtent les complexes de productions industriels, ainsi qu'une partie finale énumérant les mécanismes de gestion énergétiques et les contributions des solutions proposées pour l'optimisation des performances générales des infrastructures industrielles.

2. Qu'est-ce qu'un complexe de production industriel :

Le dictionnaire « Le Robert » annonce que le concept de complexe de production industriel se réfère à l'ensemble des infrastructures, équipements et ressources humaines nécessaires à la production et fabrication de biens jouant un rôle prépondérant dans la prospérité économique et l'innovation technologique. Tandis que l'office québécois de la langue Française assigne aux complexes de production industriels la définition suivante : « Ensemble de bâtiments et d'installations situés dans un même lieu et qui concourent à la fabrication de produits ou à la transformation d'une ressource naturelle ». (*l'Office québécois de la langue française (OQLF), 2025*) Pour mieux dire, les complexes de production industriels englobent toutes les installations s'adhérant au même processus ordonné appelé chaîne de production : de la matière première jusqu'au produit fini. Une autre recherche affirme que le complexe de production est une entité structurée, dédiée à la transformation de matières premières en produits finis prêts à être

exploités. Elle entérine, que ce dernier processus se fonde sur la prise en considération de divers facteurs de production, notamment les équipements techniques, la main d'œuvre ainsi que les nouveautés technologiques, dans le but de générer des biens à forte valeur ajoutée. (*Mouhammed & Nacer, 2016*)

A partir de cette base de données, on peut déjà s'estimer capables de ressortir avec une synthèse dans laquelle nous allons essayer de divulguer l'essence d'un complexe de production. En effet, il s'agit d'une structure régulée qui, par le biais d'une combinaison rigoureuse de moyens humains, techniques et technologique assure la conversion de la matière première en produit prêt à être exploité ; constituant ainsi un moteur des développements économique et technologique.

2.1 Contexte historique :

Le XVIII^{ème} siècle, autrement connu sous le nom du siècle des lumières, avait été marqué par une émancipation accrue et un développement considérable dans tous les domaines scientifiques. L'industrie, telle on la connaît de nos jours, est apparue dans ce laps de temps profitant de cette période marquée d'une croissante ingéniosité. Le phénomène d'industrialisation prenait marche, alors, avec l'essor de la révolution industrielle dans le continent Européen et plus précisément en Angleterre. (*Industrial Revolution., 2025*) De nouveaux modes de pensée ont généré une propagation accélérée de besoins nouveaux pour l'homme. L'artisanat, pourtant une pratique séculaire, fut abandonnée et substituée par une production mécanisée mise en avant par l'essor de la machinerie ainsi que la découverte de sources énergétiques offrant une meilleure efficacité dans la quête d'assouvir les besoins nouvellement surgis. (*Mokyr, 1999*)

La révolution industrielle a contribué largement dans le bouleversement architectural survenu dans cette période. En effet, les altérations dans les méthodes de construction étaient dues foncièrement à l'introduction de nouveaux matériaux innovateurs à l'instar du fer et de l'acier, suite à l'essor de l'industrie métallurgique, ainsi que le béton consolidé par les avancées techniques. Ces apports ont donné naissance aux usines, gares, ponts et autres édifices et équipements de grande envergure. (*Industrial Revolution., 2025*)

C'est dans ce contexte que les premiers complexes industriels ont vu le jour, caractérisée comme on l'a cité ci-dessus par des systèmes de machinerie assez développés parvenant à répondre aux exigences du marché de jadis. La machine à vapeur présente un exemple concret de ces innovations phares, pour ces qualités permettant une hausse considérable dans les volumes produits ainsi qu'une nette réduction des coûts de production. (*Mokyr, 1999*) Au début du siècle suivant, les établissements industriels se sont massivement ramifiés à travers l'Europe, tel l'exemple de la France qui s'est vu transfiguré le paysage industriel, autrement monopolisé par le secteur artisanal. (*Landes, 2003*)

Au fil du temps, une progression palpable fut constatée dans ces complexes, allant parallèlement avec le développement scientifique et technologique, qui désormais octroie un arsenal sophistiqué à ces structures, ainsi que les changements économiques et sociales. (*Letté, 2010*)

2.2. Généralités et notions relatives au sujet :

Avant d'explorer l'endopsyché de la thématique de recherche, il est nécessaire d'aborder et de clarifier quelques notions fondamentales, qui sont susceptibles de ressurgir tout au long de la recherche. Sans perdre de la vue le côté architectural, on va procéder à une tentative d'énumération des différents concepts et éléments liés aux complexes de production.

2.2.1 Composantes standards d'un complexe industriel :

Le fonctionnement d'un complexe industriel, ordinairement, repose sur plusieurs éléments fondamentaux dont les conditions de déroulement subordonnent le succès de l'activité de production et de réponse aux besoins du marché. Ces composantes s'exercent des influences réciproque conditionnant ainsi la performance du complexe de production par le bon agencement de toutes ces dernières. Ces éléments clés sont comme suit :

2.2.1.1 Infrastructure physique :

Englobant l'ensemble des bâtiments dont se passe les processus relatifs à la production, leurs entrepôts ainsi que les différentes installations logistiques, l'infrastructure physique

constitue l'identité superficielle du complexe industriel. Avoir une bonne connaissance et une capacité d'agencement spatial méticuleuse est requis avant de procéder à la projection de telles structures. En effet, d'innombrables normes et exigences, visant à assurer une fluidité spatiale et fonctionnelle ainsi que garantir la sécurité totale des utilisateurs, doivent être respectées lors de la confection de ces entités. (*Morice, 2025*)

2.2.1.2 Équipements :

Ces constituants comportent l'ensemble de systèmes de machinerie, lourde ou légère, outillage et technologies dont dépend le procédé de fabrication d'un complexe de production. Le choix convenable de la nature d'équipements à adopter est prépondérant, afin d'assurer la fluidité du procédé de fabrication, améliorer sa qualité et de garantir une épargne quant aux coûts. Dès les tapis roulants, on peut aller jusqu'à opter pour un système étayé par des robots industriels ou bien une production assistée par ordinateur ; cela est subjugué à la finalité que ces équipements doivent servir. (*GlobalTradeMag, 2025*)

2.2.1.3 Ressources humaines :

La main d'œuvre, en outre, constitue irrévocablement une partie intégrante d'un complexe de production. La compétence de celle-ci est cruciale dans le bon déroulement des opérations. En effet, la présence d'une main d'œuvre qualifiée, composé tantôt d'ingénieurs et gestionnaires, tantôt de techniciens et opérateurs de machines, capable de gérer les processus de production, peut se révéler d'importance vitale pour le complexe. Cependant, une formation continue de cette main d'œuvre s'impose afin d'avoir l'habileté de s'adapter aux futures innovations permettant de maintenir la compétitivité du produit proposé dans le marché. (fac.umc.edu.dz)

2.2.1.4 Systèmes de gestion :

Les systèmes de gestion dans les complexes peuvent faire office de planificateurs, contrôleurs et galvanisateur de sa production. Ils comportent des logiciels de gestion intégrée, des systèmes de capture, d'analyse et de résolution de données à temps réel, des systèmes de gestion de qualité,...etc.

Leur rôle est de faciliter le mécanisme de coordination des autres composantes du complexe de production, et d'agir, en cas de nécessité, face aux lacunes et inefficacités constatées dans celui-ci. (*Emma, 2025*)

2.2.2 Processus de production au sein d'un complexe industriel :

Le processus de production dans un complexe industriel sous-entend l'ensemble des phases, qui organisés en ordre, servent à la transformation des matières premières en des produits prêts à la distribution. Il enferme généralement l'approvisionnement, la préparation, la fabrication, l'assemblage, le contrôle qualité, le conditionnement ainsi que stockage et distribution. En voici quelques notions clés qui lui sont étroitement liées :

2.2.2.1. Chaîne de production :

L'expression chaîne de production renvoie à l'ensemble des opérations fonctionnant dans la finalité de mettre le produit sur le marché. Le mécanisme s'organise autour d'une constellation de "postes de travail" agencés en chaîne de façon coordonnée ; d'un poste à l'autre, où il subit des transformations, il transite jusqu'à l'assemblage ultime avant d'être préparé à l'expédition et la distribution. (*l'Office québécois de la langue française (OQLF), 2025*)

Dans cette chaîne sont compris les postes de travail suivant : le traitement des matières premières, la fabrication, le contrôle qualité...ainsi que d'autres composantes à l'image des équipements nécessaires, la maintenance, les opérateurs, l'information, ...etc.

Les premières chaînes de production ont jailli vers la fin du XII^{ème} siècle. Jusqu'à cette période, les processus industriels furent subjugués à des contraintes pratiques. Les processus demeuraient à proximités les uns des autres, et implantés près des sources d'extraction d'énergie à cause de l'impossibilité de transporter les matières premières des longues distances ; les moyens nécessaires au transport de celles-ci faisant défaut. L'invention des moteurs à vapeur dénoua la situation. Désormais, quoiqu'une certaine proximité était indispensable pour des raisons d'épargne, les infrastructures industrielles ne devaient plus rester « collés » aux sources d'énergie ; tandis qu'une nouvelle exigence s'imposait ; celle de se rapprocher des lieux de vie des ouvriers. (*Friedmann, 1956*) La première véritable chaîne de production, faisant réunir les différentes phases de fabrication au sein du même bâtiment, apparaissait en l'an 1780. Tandis que la première chaîne de montage, qui fut inventée par Eli Whitney, a été exploitée par la

compagnie dédiée à la fabrication automobile « Ford Motors » vers 1913, qui fut une innovation en la matière ; avec la capacité de transiter, sans interruption, un produit d'un poste de travail vers l'autre. (*Ford, 1922*)

Les apports de la chaîne de production ne se bornent pas uniquement à l'assemblage des produits. En effet, elle facilite l'ajustement en termes de quantités produites vis-à-vis des besoins attendus évitant ainsi la dilapidation des ressources, le surstockage ou bien la sous-production. Par ailleurs, ce système assure la qualité des produits tout au long des différentes phases de fabrication ainsi qu'une habileté à maîtriser les délais prévus à la production. En outre, elle est susceptible d'offrir au complexe industriel une flexibilité à l'égard du marché en produisant d'une manière simultanée divers produits s'adaptant ainsi à la demande variée. (*Durand, 2019*)

2.2.2.2. Flux, capacité de production et productivité

Le flux de production renvoie au mode de mouvement et de circulation des ressources, qu'elles soient matières premières ou bien produits finis ainsi que les informations et capitaux dans un système ou une chaîne de production. On distingue trois types de flux principaux. Les flux physiques sont liés aux actions de transporter les matières premières de et vers l'usine ou le complexe industriel ainsi que les produits finaux ; Le second type se relate aux flux d'informations telles que les commandes, les stocks et les prévisions dont dépend le fonctionnement du mécanisme industriel, en étant les données nécessaires à la production. Finalement, on note les flux financiers relatifs aux différentes transactions survenues au cours des procédés de productions et de distribution. (*Stevenson, 2017*)

La capacité de production, est un concept qui signifie la capacité maximale en termes de quantité de production, durant une période donnée, en fonction des ressources disponibles (machinerie, matière première, main d'œuvre, ...etc.). Les facteurs susceptibles d'influencer la capacité de production incluent le type d'équipements voués à la production ainsi que leurs nombre et performances respectives ; le degré de qualification de la main d'œuvre disponible, et enfin, le système suivi dans l'ajustement des processus de fabrication. (*Slack, 2019*)

La productivité évalue l'efficacité globale de l'exploitation des ressources dans la production des biens et des services. Les formules récurrentes en ce sujet sont comme suit :

*Productivité du travail = Production totale ÷ Nombre d'heures travaillées

*Productivité machine = Production totale ÷ Temps de fonctionnement des machines (*Krugman, 2018*)

2.2.3 Typologies des complexes de production industriel :

La volatilité des besoins à assouvir avait conduit vers une diversification dans les types de complexes industriels visant à répondre aux demandes ; en voici les principaux types cernés selon leurs caractéristiques et modes de fonctionnement :

-Industrie lourde : ce type concerne la fabrication de produits d'ampleur importante ou d'une complexité accentuée et qui font généralement partie intégrante dans le processus de productions d'autres industries ; pour ainsi dire ils ne sont pas destinés directement aux consommateurs. Ces installations comprenant des domaines comme la sidérurgie, la construction navale et autres, nécessite la disponibilité d'une main d'œuvre hautement qualifiée, ainsi que des investissements massifs en capital et infrastructure. Leurs empreintes écologiques est estimée très conséquente en raison de la consommation importante des ressources et les émissions polluantes qui lui sont associées. (*Chandler, 1990*)

-Industrie légère : l'industrie légère comporte des secteurs économiques assez diversifiés à l'image de l'habillement, les produits électroniques, les meubles, ...etc. à l'opposé des industries lourdes, l'industrie légère génère des produits destinés vers le consommateur, et ne nécessite pas un afflux massif de capital et de ressources. Elle est, en outre, plus responsive aux fluctuations des données du marché et détient un impact environnemental moindre. (*Porter, 1985*)

-Industrie manufacturière : à travers des procédés différents, pouvant être mécaniques, biologiques ou chimiques, l'industrie manufacturière comprend l'altération de la matière première en un produit fini ou semi-fini. Ces complexes sont tantôt d'envergure, avec des vastes installations automatisées, tantôt de petites tailles avec des usines spécialisées. L'industrie manufacturière couvre des secteurs tels que l'automobile, l'aéronautique et le textile. Ces complexes préconisent l'efficacité, l'innovation ainsi que la qualité afin de pouvoir demeurer compétitif sur le marché. (*Stevenson, 2017*)

-Industrie de transformation : à l'instar de l'industrie manufacturière, l'industrie de transformation focalise sur la transformation de la matière première en produits finis. Elle se distingue par sa situation souvent à proximité des sources d'extraction des matières, disposition minimisant les coûts de transport et galvanise la chaîne de production. Elle comporte des domaines à l'image de l'agroalimentaire, la chimie, la pétrochimie, et la production des matériaux de construction. (*Krugman P. , 1991*)

-Industrie high-tech : ce type englobe les secteurs orientés vers l'innovation technologique. On peut distinguer des domaines comme les technologies d'information, la biotechnologie, la microélectronique, ainsi que plusieurs autres. Les complexes high-techs exigent des investissements onéreux en recherche et en développement ainsi que le recrutement d'une main d'œuvre habile et qualifiée. (*Castells, 1996*)

Type d'industrie	Secteur de production	Caractéristiques
Industrie lourde	Fabrication de produits complexes ou d'envergure faisant partie du processus de production d'autres industries.	-nécessitant une main d'œuvre qualifiée et un afflux important de capitaux. -Empreinte écologique importante.
Industrie légère	Habillement, les produits électroniques, les meubles, ...etc.	-Production destinée au consommateur -ne nécessitant pas des ressources colossales et est plus flexible face aux fluctuations du marché. - Empreinte écologique amoindrie.
Industrie manufacturière	L'altération de la matière première en un produit fini ou semi-fini couvrant des secteurs tels que l'automobile, l'aéronautique et le textile.	-Elles est confrontée au défi de rester compétitive sur le marché, pour cela, cette industrie préconise l'efficacité, l'innovation et la qualité.
Industrie de transformation	Transformation de la matière première en produits finis et comportant des domaines tels que l'agroalimentaire, la chimie, la	-Implantation auprès des sources d'extraction : disposition frugale.

	pétrochimie, la production des matériaux de construction, ...etc.	
Industrie high-tech	Les secteurs orientés vers l'innovation technologique à l'image des technologies d'information, la biotechnologie, la microélectronique, ...etc.	- nécessitant des investissements et des capitaux conséquents.

Tableau 01 : Synthèse des différentes typologies de complexes de production, source : Traitement personnel

2.2.4. Implantation du complexe : choix crucial :

La situation dans laquelle s'est implanté un complexe industriel de production, constitue un facteur crucial qui est susceptible de déterminer son niveau de performance. Afin de garantir la rentabilité et l'efficacité de l'infrastructure, le choix du périmètre d'implantation doit être fondé sur une grille multicritère qui comporte ce qui suit :

2.2.4.1. Proximité des Matières Premières :

À l'image des infrastructures associées à la sidérurgie, qui ont une tendance systématique à s'implanter près des mines de fer, il est indispensable à tout type d'industrie d'assurer une implantation stratégique aux abords des sources d'extraction de la matière première. La localisation stratégique à proximité des sources, permet l'accès facile aux ressources et, ainsi, la réduction des frais logistiques liés au déplacement. (Jaurès, 2025)

2.2.4.2. Accès au marché :

L'implantation à proximité des marchés visés permet de simplifier la distribution des articles achevés et d'accélérer les temps de livraison. En outre, se situer près des régions qui présentent des taux de demande élevés contribue d'une façon significative à réduire les frais de transport et accroître le degré de satisfaction de la clientèle. Avant de s'établir, les sociétés ont souvent tendance à mesurer la dimension et le potentiel d'expansion du marché local. (Abdellah, 2025)

2.2.4.3. Disponibilité de la main d'œuvre qualifiée :

Il est essentiel d'avoir une main-d'œuvre compétente et en nombre. Les sociétés cherchent des zones où le niveau de compétence répond à leurs exigences particulières. En outre, le coût du travail et la souplesse du marché de l'emploi (règles concernant les heures supplémentaires, aisance d'embauche et de licenciement) sont des éléments clés. *(Jaurès, 2025)*

2.2.4.4. Proximité des infrastructures de transport :

La proximité et la disponibilité des infrastructures de transport à l'image des routes viabilisées, des voies ferrées ou encore des ports et des aéroports est un facteur indispensable afin d'assurer l'arrivée des premières matières et l'expédition fluide des produits finis. La disponibilité d'une infrastructure assurant cette connectivité permet à l'infrastructure de faire régresser, d'une manière conséquente, ses dépenses logistiques et lui facilite la tâche de s'adapter et de répondre aux variations du marché. *(Nord France Invest, 2025)*

2.2.4.5. Potentielles dépenses de production :

L'un des facteurs les plus décisifs dans le choix de l'emplacement de l'infrastructure est les coûts de production. En effet, les dépenses relatives à l'alimentation en énergie, à l'adduction en eau, aux terrains et aux impôts locaux assujetties le choix d'implantation des sociétés. Celles-ci, ont souvent tendance à favoriser l'option la plus frugale et présentant le plus de potentiel de rentabilité et de flexibilité. *(Jaurès, 2025)*

2.2.4.6. Environnement réglementaire et fiscal :

L'environnement juridique présentant des avantages pécuniaires pour les entreprises et les sociétés, à l'image des aides financières, la simplicité des procédures administratives, des allègements fiscaux, ...etc. constitue un facteur important dans le choix de l'emplacement des infrastructures. En effet, ces mesures propices qu'on vient de citer constituent à eux seuls des stimulants attrayants pouvant attirer un afflux considérable d'investissements et d'installation de nouvelles entreprises dans une région. A cela, on rajoutera les facteurs de stabilité politique et de sécurité judiciaire qui jouent également un rôle prépondérant. *(Nord France Invest, 2025)*

2.2.4.7. Qualité de vie et services auxiliaires :

Le niveau de vie et les services (éducation, santé, logement,...etc) que détient un lieu quelconque joue un rôle essentiel dans l'attrait des talents et de la main d'œuvre ingénieuse. L'existence de centres de recherche, d'instituts spécialisés ou de fournisseurs locaux peut également susciter un environnement propice à une industrie florissante. (*Nord France Invest, 2025*)

2.2.5 Organisation des complexes de production : un zonage fonctionnel :

La conception des complexes industriels intègre souvent une planification urbaine stratégique, visant à optimiser l'utilisation de l'espace et à faciliter les flux de production.

Ils intègrent un zonage intelligent d'après lequel les espaces sont organisés en fonction des vocations et des activités pratiqués, afin de minimiser les flux de circulation ; et comportent une infrastructure optimisée avec des espaces suffisants dédiés à la circulation et le déplacement rendant plus fluide les potentiels échanges. Une approche compacte et verticale aussi est adoptée dans la finalité de réduire l'étalement et conserver au maximum l'espace urbain, pour cela les industries adoptent des structures bâties à étages multiples que va suivre l'organisation de la production.

Par ailleurs, les complexes de production se focalisent sur leur intégration dans l'environnement urbain. Leur conception vise à rendre infime les nuisances qu'elles ont le potentiel de générer et favorise une cohabitation harmonieuse avec les infrastructures voisines. (*Guichard, 2000*)

2.3. Enjeux et défis contemporains des complexes de production industriels :

Quoiqu'ils jouent un rôle prépondérant dans la machine économique mondiale, le fonctionnement des complexes industriels suscite l'attention des détracteurs. En effet, d'innombrables inculpations se sont émergées, au cours des dernières décennies, quant aux mécanismes de gestion de ces infrastructures. Actuellement, le secteur industriel, sous une

énorme pression sociale, se retrouve contraint de confronter et de satisfaire plusieurs défis liés à l'efficacité, la durabilité et l'innovation.

2.3.1 Défis environnementaux et écologiques :

Depuis leur création, les infrastructures industrielles, hormis leur rôle économique, sont singulièrement connues pour leur incidence misanthropique sur l'environnement. En effet, toute aubaine économique générée par le secteur industriel est octroyée au détriment de la nature. La combustion des ressources fossiles, qui constitue la base du fonctionnement des complexes industriels, provoque des émissions massives des gaz à effet de serre ; ces derniers qui sont les premiers responsables du réchauffement climatique en cours. Par ailleurs, le recours à outrance aux sources hydrauliques afin d'assurer l'auto dépendance en eau et l'exploitation de ces sources comme rejet des polluants industriels provoque la détérioration des écosystèmes aquatiques. En outre, la gestion souvent médiocre des résidus solides et toxiques entraîne une dégradation des sols et compromet le bien-être de la biodiversité.

Afin de pouvoir confronter ces défis, l'optimisation de l'efficacité énergétique, la mise en œuvre efficiente de processus de recyclage et autres solutions, doivent être les priorités hâtant tout complexe de production industriel. ((*UNEP*), 2019)

2.3.2 Enjeux socio-économiques :

Les complexes de production industriels détiennent un rôle important dans la société. D'abord, ils constituent des institutions qui, à travers la création accrue d'emplois diversifiés et la galvanisation de la compétitivité régionale qu'ils suscitent, plaident pour une expansion économique. En outre, les importantes recettes fiscales qu'ils sont susceptible de générer s'avèrent cruciales dans le développement des infrastructures publiques. Néanmoins, ces complexes industriels peuvent susciter une certaine disparité régionale et renforcer la dépendance, d'une région quelconque, à l'égard de certains secteurs de l'industrie.

Par ailleurs, leur influence sociale n'est pas moindre. En effet, comme ce fut souvent le cas à travers les deux derniers siècles, l'industrialisation massive et la congrégation de complexes de production ont comme résultat inéluctable l'exode rural et la transformation profonde des

structures sociales locales. D'un autre côté, ces complexes peuvent être confrontés à des soucis liés aux dangers professionnels, si ces infrastructures ne présentent pas le degré optimal de sécurité, des problèmes liés à la précarité ainsi que des tensions et conflits syndicaux.

Afin de parer à ces défis, les infrastructures industrielles doivent adopter des méthodes, plus éthiquement penchées, qui garantissent un environnement de travail adéquat, et une incorporation fluide de l'industrie et de ses opérations au sein de la société. ((UNIDO), 2020)

2.3.3. Une combinaison « philanthropie-technologie » comme remède ?

Comme on l'avait souligné ci-dessus, les infrastructures industrielles en général et les complexes de production en particulier se heurtent actuellement à de nombreux défis. En amont, on retrouve la gestion des ressources énergétiques et la réduction des empreintes écologiques ; en aval, on discerne l'adaptation aux constantes évolutions technologiques et changements dans tous les domaines, en passant par les enjeux relatifs à l'amélioration des conditions de travail et autres ; la conciliation de deux concepts, qui au premier coup d'œil peuvent paraître paradoxaux, est susceptible de s'avérer le salvateur de cette situation. Les concepts auxquels on fait allusion sont la philanthropie et la technologie.

D'un côté, l'adoption des principes et des valeurs philanthropiques capables de proposer des solutions réduisant les impacts néfastes de l'industrie et assurant des infrastructures industrielles plus durable et écoresponsables ; et de l'autre côté, l'exploitation des avancées technologiques pour proposer des processus de production plus optimaux, plus efficaces, et , grâce à l'aide de l'automatisation et de l'intelligence artificielle, à dilapidation amoindrie des ressources.

Cette combinaison ingénieuse entre engagement philanthropique et innovations technologiques, est susceptible de non seulement de proposer de futures infrastructures industrielles à haut potentiel de rentabilité, mais aussi les présentant en tant qu'acteurs majeurs du développement durable.

Dès lors, quels sont spécifiquement ces solutions qui proposent des entreprises industrielles conciliant l'efficacité économique au progrès social ? Dans ce qui suit, nous allons projeter ces

notions, en les définissant, en présentant leurs différentes variations et en déterminant les meilleurs choix pour leur mise en œuvre dans un complexe industriel de production.

3. Smart building :

3.1 Berceau, évolution & perspectives :

Le smart building, qui signifie littéralement bâtiment intelligent, est un concept qui avait surgi vers la fin du siècle précédent, à travers les premières tentatives d'automatiser certains aspects relatifs au bâtiment. Vers les années 1970, les secteurs de l'éclairage et du chauffage ont vu l'émergence des systèmes de gestion centralisée, qui visent à offrir une régulation optimisée et une réduction dans les consommations énergétiques. La décennie qui suit, a témoigné de l'émergence de ce qu'on appelle les Building Management Systems ou bien les systèmes de gestion des bâtiments (BMS). Ces derniers en procurant une supervision centralisée plus rigoureuse des installations techniques du bâtiment, assuraient une nette amélioration en termes d'efficacité énergétique et spécialement un essor en matière de contrôle et de maintenance de ces installations. (*Association*, 2015) L'entreprise Américaine « United technologies » fut l'un des précurseurs d'incorporation des technologies de pointe dans le domaine du bâtiment. D'ailleurs, en l'an 1984, elle eut le mérite d'ériger aux états unis, et plus précisément à Hartford, le premier bâtiment, qu'on qualifiera plus tard de « smart ». Le projet en question comprenait une intégration d'un réseau informatique sophistiqué servant à la régie et gestion des différents équipements. (*Corporation*, 1984)

À l'issu de l'avènement d'internet et l'essor des technologies de l'information, vers la fin des années 1990 et début des années 2000, l'implémentation de ces innovations avait bouleversé le concept de smart building. L'incorporation de réseaux informatiques associée aux systèmes fonctionnant à base de capteurs multiples à rendu le champ propice pour une connectivité accrue entre les différents systèmes du bâtiment. En outre, au cours de cette période, les bâtiments intelligents ont entamé l'utilisation de techniques reposant sur la domotique avancée qui offre à l'occupant l'opportunité d'avoir le contrôle sur l'éclairage, la climatisation ainsi que la sécurité, par le biais d'interfaces numériques. Par ailleurs, cette période fut marquée par l'éclosion de plusieurs normes visant à optimiser les couts relatifs à l'usage de ces équipements et systèmes en

assurant leur interopérabilité, à l'image de BACnet et LonWorks. (*Association*), *Intelligent Buildings and Smart Cities: A Market Overview*, 2015)

Désormais, depuis le début de la dernière décennie et jusqu'à nos jours, les bâtiments intelligents se sont propulsés vers une autre dimension en exploitant les nouvelles innovations à l'instar de l'internet des objets (Iot) et l'intelligence artificielle (IA) ; celles-ci leurs ont permis de ne plus se borner à être automatisés, mais encore d'avoir l'aptitude d'assimiler, analyser et prédire les besoins de leurs occupants. Par ailleurs, les analyses en temps réel d'innombrables paramètres, comme la qualité de l'air, la température ainsi que l'occupation spatiale sont devenues un atout majeur du smart building qu'avait permis l'essor des capteurs connectés fonctionnant réciproquement avec les plateformes de gestion des données (Big Data). Ceci a non seulement contribué à l'évolution des systèmes mais avait suscité l'émergence de ce qui appelé bâtiments autonomes capables de gérer et d'ajuster les fonctionnements qui leurs sont relatifs, sans avoir recours à l'intervention humaine. (*Buckman*, 2014)

Désormais, les bâtiments intelligents jouent un rôle central dans la planification urbaine stratégique des villes intelligentes, contribuant à une gestion plus rationnelle et durable des infrastructures urbaines. (*IEA*), 2021)

Son travestissement depuis les rudiments des systèmes automatisés, lors des années 1970, jusqu'à nos jours marqués par l'incorporation de l'intelligence artificielle et l'essor des bâtiments autonomes, fait preuve d'une transfiguration profonde dans le secteur du bâtiment. Ses technologies, permettent d'améliorer l'efficacité énergétique, le confort des occupants, la sécurité et la gestion des espaces tout en en contribuant à un développement plus durable. (*Association*), *Connected Homes and Intelligent Buildings: 2020 Market Overview*, 2020)

3.2. Smart building en Industrie: Industrie 4.0

L'industrie intelligente, également connue sous le nom d'industrie 4.0, fait référence à la transformation numérique des processus de production par l'intégration de technologies sophistiquées telles que l'intelligence artificielle (IA), l'Internet des objets (IoT), le big data et la robotique de pointe. Cette progression a pour but d'accroître l'efficacité, la souplesse et la pérennité des systèmes industriels par l'automatisation et l'optimisation des opérations en direct.

L'industrie intelligente offre donc une production plus flexible, apte à satisfaire les exigences du marché tout en optimisant la gestion des ressources et en diminuant les dépenses.

3.3. Les complexes de production industriels intelligents :

3.3.1. Qu'est-ce qu'un complexe de production industrielle à l'ère de l'Industrie 4.0 ?

Une installation de production industrielle est un site où différentes activités de fabrication sont regroupées afin de réaliser des produits ou des services. À l'ère de l'industrie 4.0, ces complexes se transforment en usines intelligentes qui incorporent des technologies telles que l'Internet des objets (IoT), l'automatisation sophistiquée, l'intelligence artificielle (IA) et le Big Data. Ces technologies facilitent une interaction en direct entre les machines, les systèmes et les produits, optimisant par conséquent les processus de production tout en améliorant la souplesse et l'efficacité. Une smart factory typique intègre des systèmes cyber-physiques qui supervisent les processus physiques, génèrent une réplique numérique de la réalité et font des choix décentralisés. Cette méthode permet une production plus flexible, apte à réagir rapidement aux variations du marché et aux requêtes spécifiques des clients. *(Hermann M. P., 2016)*

3.3.2. Notions relatives à l'industrie intelligente :

3.3.2.1. Les usines intelligentes : Une usine intelligente représente une mise en œuvre pratique de l'industrie 4.0. C'est un site de fabrication fortement connecté, où les équipements, les détecteurs et les systèmes informatiques collaborent pour optimiser la productivité et la qualité. L'IoT permet aux appareils de communiquer des données en direct, facilitant un suivi constant et une maintenance prédictive pour prévenir les défaillances. Les cobots, ou robots collaboratifs, aident les employés en s'occupant des tâches répétitives ou périlleuses, ce qui améliore les conditions de travail et la sécurité. De plus, l'usine intelligente privilégie la production sur mesure, en ajustant ses chaînes de production aux besoins spécifiques des clients, tout en optimisant l'utilisation de l'énergie et la gestion des résidus. *((IEA), Smart Industry for a Smart Energy Future, 2021)*

3.3.2.2. Le complexe de production intelligent : L'idée d'usine intelligente est largement étendue dans le concept de complexe de production industriel intelligent. Il rassemble plusieurs

entités de production reliées au sein d'un même écosystème industriel, incorporant des chaînes logistiques intelligentes et des infrastructures automatisées. Ces complexes emploient des systèmes de gestion centralisés, aptes à traiter d'énormes quantités de données afin d'organiser efficacement la production, la distribution et l'entretien. On les associe fréquemment aux plateformes cloud et à l'intelligence artificielle pour affiner la prise de décision et assurer une réactivité optimale face aux variations du marché. Ces installations, en adoptant des énergies vertes et des méthodes respectueuses de l'environnement, aspirent aussi à une production durable qui réduit au minimum l'empreinte écologique tout en optimisant la productivité industrielle. *(Hermann M. P., 2016)*

L'intelligence dans les complexes industriels intelligents se construit sur quatre échelons distincts :

Le niveau premier concerne la requête de données. Celle-ci se fait à travers une collecte massive de données générées par le biais de capteurs ajustés aux machines et différentes installations tout au long de la chaîne logistique du complexe. Dans cette échelle, en outre, la collecte de donnée est susceptible d'être accomplie, manuellement, à travers l'extraction de données à l'aide de systèmes historiques. Le second niveau concerne la contextualisation de données. En effet, les données acquises sont organisées et mêlées entre elles à partir de différents domaines afin de générer une narration plus importante. Ensuite, des méthodes liées à l'intelligence artificielle et le machine learning sont impliqués dans le troisième niveau. Ceci procure aux industriels la capacité de prédire les résultats futurs sans trop dépendre de l'apport humain. Enfin, dans le niveau quatre et final, où l'on met les données en action, le rôle prépondérant revient aux robots et machines qui agissent en fonction des analyses continues qu'ils eurent effectués sur les flux de données. Vers la fin du procédé, les résultats seront réintégrés dans le système en boucle fermée qui garantira une amélioration continue dans le processus de prise de décision au fil du temps. En achevant ces quatre niveaux, les complexes de production réalisent la vision complète et autonome de l'industrie 4.0. *(Lu, 2017)*

3.3.2.3. l'intelligence dans les complexes de production industriels : échelles d'application :

-La machinerie et la régie : L'intégration de l'intelligence dans les équipements et la gestion d'un complexe de production industriel se base sur l'emploi de capteurs IoT et de systèmes d'automatisation sophistiqués. Ces systèmes offrent une surveillance continue des appareils, recueillant et examinant constamment des informations sur l'état des équipements, la température, la pression ou même la consommation d'énergie. Ces données permettent aux entreprises d'implémenter une maintenance prédictive, anticipant les défaillances avant leur apparition et minimisant de cette façon les périodes d'inactivité imprévues. Cette optimisation permet non seulement d'accroître la productivité, mais également de prolonger la longévité des équipements tout en garantissant la sécurité des opérateurs. Grâce à l'intégration de l'intelligence artificielle et de l'analyse des données, les complexes industriels gagnent en efficacité, en flexibilité et en résilience pour faire face aux défis contemporains de l'industrie. (Lu, 2017)

-La conception architecturale : L'incorporation de l'intelligence dans la conception architecturale d'une installation de production industrielle fait appel à des modèles numériques sophistiqués et à des simulations dynamiques. En utilisant la modélisation tridimensionnelle et les outils de BIM (Modélisation de l'information du bâtiment), nous pouvons optimiser la disposition des installations, en prenant en compte les flux de production, le mouvement des matériaux et le déplacement des employés. Ces outils facilitent la détection des points de congestion, minimisent les déplacements superflus et optimisent l'efficacité énergétique en incorporant des approches durables, telles que la gestion efficace de la lumière naturelle et de la ventilation. En envisageant divers scénarios préalablement à la construction, les professionnels de l'industrie sont en mesure de créer des espaces plus pratiques, polyvalents et conformes aux demandes des technologies de production récentes, assurant ainsi une performance optimale de l'ensemble du complexe. (Lu, 2017)

-La gestion de la consommation énergétique : L'intégration de l'intelligence dans la gestion de l'énergie au sein d'un complexe industriel est basée sur l'emploi de systèmes de gestion technique du bâtiment (GTB), ou bien le Building Management Systems (BMS). Ces technologies garantissent une gestion centralisée des dispositifs consommateurs d'énergie, comme le chauffage, la ventilation, la climatisation et l'éclairage. Ces systèmes, en évaluant

continuellement la consommation d'énergie et les exigences des installations, autorisent une optimisation dynamique qui diminue le gaspillage et améliore l'efficacité énergétique. En outre, l'incorporation de capteurs IoT et d'algorithmes d'intelligence artificielle rend possible l'automatisation des ajustements, adaptant les réglages aux conditions de production et aux prévisions météorologiques. Cette méthode aide à baisser les coûts énergétiques et à réduire l'empreinte carbone, soutenant de ce fait une industrie plus durable et responsable. (Lu, 2017)

-La requalification des moyens humains : La requalification du personnel d'un complexe industriel est un outil crucial pour réussir la transition vers l'industrie 4.0. Face à l'avènement des technologies avancées, la formation continue s'impose comme une nécessité pour aider les employés à se familiariser avec les outils numériques, les systèmes automatisés et les procédures de maintenance prédictive. Les cursus de formation englobent l'étude de l'intelligence artificielle, de l'Internet des objets (IoT) et des logiciels de gestion sophistiqués, assurant ainsi une meilleure adéquation aux nouvelles demandes de l'industrie. En mettant l'accent sur le perfectionnement des compétences, les entreprises favorisent une augmentation de la productivité, minimisent les erreurs et garantissent une interaction homme-machine plus efficace. Cette méthode non seulement met en valeur le capital humain, mais également facilite une transition harmonieuse vers une industrie plus performante et novatrice. (Lu, 2017)

3.3.2.4. Quels moyens à déployer pour assurer un complexes industriels intelligentes ?

- Internet des objets (IoT) et connectivité : L'Internet des objets (IoT) est essentiel pour garantir une connexion sophistiquée entre les appareils, les capteurs et les systèmes de gestion. Au moyen de systèmes interconnectés, on peut recueillir et examiner des informations en temps réel, ce qui permet une surveillance anticipée des équipements et une amélioration constante des procédures de production. Les capteurs intelligents identifient les fluctuations de performance, préviennent les défaillances et modifient automatiquement les réglages pour assurer une efficacité optimale. En outre, cette connectivité optimise le suivi des produits, la gestion des inventaires et l'organisation logistique. L'IoT, par le biais de l'intelligence artificielle et du big data, révolutionne l'industrie en la transformant en un écosystème réactif, autonome et performant, ce qui diminue les dépenses tout en améliorant la productivité. (Hermann M. P., 2016)

- **Automatisation et robotisation :** Dans les installations industrielles intelligentes, l'automatisation et la robotisation sont primordiales pour améliorer les procédés de production. L'implémentation de robots industriels et de systèmes automatisés contribue à renforcer la précision, minimiser les fautes humaines et booster l'efficacité opérationnelle. Les robots collaboratifs (cobots) permettent d'exécuter des tâches répétitives ou dangereuses de manière fiable, ce qui augmente la sécurité des employés et leur donne l'occasion de se focaliser sur des projets plus valorisants. En outre, l'intelligence artificielle (IA) et le machine learning offrent aux robots la capacité d'ajuster leurs actions en temps réel, ce qui rend la production plus adaptable et réactive aux exigences du marché. Cette automatisation contribue à la diminution des dépenses tout en perfectionnant constamment la qualité des produits. (Lu, 2017)

- **Intelligence artificielle et Big Data :** Dans les complexes industriels intelligents, l'intelligence artificielle (IA) et le Big Data sont des technologies essentielles pour une gestion efficace des processus de production. L'IA utilise des algorithmes sophistiqués pour examiner d'importants volumes de données produites par les machines, les capteurs et les systèmes de gestion. Cette étude aide à repérer les tendances et à déceler les anomalies avant qu'elles ne posent un problème. Grâce à l'association de l'intelligence artificielle et du Big Data, les sociétés sont en mesure d'optimiser leurs procédures, de modifier les paramètres de production en temps réel, ce qui leur permet d'améliorer la qualité, de diminuer les dépenses et d'accroître leur flexibilité. Par ailleurs, ces technologies offrent la possibilité d'anticiper les futurs besoins en termes de production, d'approvisionnement et de maintenance, instaurant ainsi une production plus agile et performante. (Lu, 2017)

- **Blockchain pour la traçabilité et la sécurité :** la blockchain s'affirme comme un instrument efficace pour assurer la traçabilité et la sûreté des informations tout au long du processus de production. La blockchain, par son système décentralisé et inaltérable, offre une possibilité d'enregistrement sécurisé de chaque opération, depuis sa création jusqu'à sa diffusion, garantissant ainsi une transparence complète. Chaque phase de la fabrication et chaque déplacement de produit sont traçables avec une précision absolue, minimisant ainsi les chances de malversations ou d'erreurs. Cette technologie consolide la confiance des clients et des associés commerciaux, tout en assurant l'intégrité des informations. Par ailleurs, la blockchain simplifie la

gestion des inventaires et favorise une meilleure synchronisation au sein de la chaîne d'approvisionnement, contribuant ainsi à une production plus performante et sécurisée. (Lu, 2017)

- Systèmes de gestion des bâtiments (BMS) et gestion technique des bâtiments (GTB) : Les systèmes de gestion de bâtiment (BMS) et de gestion technique du bâtiment (GTB) sont essentiels pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort des utilisateurs. Ces systèmes centralisés offrent la possibilité de gérer et de réguler toutes les installations techniques d'un bâtiment, comme le chauffage, la ventilation, la climatisation et l'éclairage, en fonction des nécessités effectives et des conditions environnementales. En utilisant des détecteurs intelligents et des algorithmes prévisionnels, les systèmes de gestion de batterie (BMS) et les systèmes de contrôle technique global (GTB) assurent une administration dynamique de l'énergie, ce qui diminue la consommation et augmente l'efficacité énergétique. Par ailleurs, ces dispositifs favorisent une maintenance préventive en identifiant les irrégularités et en organisant les interventions avant qu'elles n'entraînent des pannes, assurant de ce fait une gestion efficace et pérenne des équipements. (Hermann M. P., 2016)

4. Philanthropie : Flexibilité, Résilience & Durabilité Architecturale :

4.1. Philanthropie :

La philanthropie est un terme composé des mots grecs « Philos » signifiant ami ou amour et « anthropos » faisant référence à l'être humain. Le concept renvoie à un comportement et un ensemble d'attitudes bienfaisantes envers qui se manifeste à travers des actions altruistes et désintéressés. (Universalis, 2025)

Le concept a pris sa naissance lors de la période de l'antiquité. Là, il renvoyait à l'attitude altruiste des nobles et élites de ces temps à l'égard des infortunés, tantôt à travers des actes en faveur du bien commun tantôt par des aides apportés aux citoyens. Tandis que lors du XVIII^e siècle, le terme a subi des modifications à sa signification ; les esprits éminents de l'époque le distinguaient de la charité chrétienne conventionnelle. Cette dernière qui se bornait à l'assistance apportés aux individus, fut jugée insuffisante dans l'optique de la résolution des problèmes que connaît la société. Ceux-ci plaidaient pour des réformes sociales et éducatives qui visaient à améliorer le niveau intellectuel général et de là diminuer les degrés de pauvreté. En l'an 1780, fut fondée en France la Société Philanthropique de Paris marquant un tournant important dans la

cristallisation et la structuration organisée autour du concept. Cette association entreprenait des actions de prospection, selon des critères, des catégories dépourvues de la société afin de leur porter l'aide nécessaire tout en gardant le respect de leur dignité et leur autonomie. (*Gueslin, 1998*)

Donc, les motivations derrière le recours aux actions philanthropiques variaient tantôt ce fut des motivations d'ordre morales ou religieuses poussées par des sentiments innés de compassion ou d'empathie ; tantôt ce fut des enjeux purement d'intérêts sociaux ou politiques qui incitaient les classes supérieures à estomper des mauvaises conjectures que connaissait la société à l'époque.

Au temps moderne, le concept de philanthropie a revêtu un nouveau costume, s'alignant avec les défis contemporains. Le statut des organisations dévouées au concept philanthropique varie, des organisations gouvernementales à des entreprises privées à caractère non lucratif. L'essor technologique et la tendance à la mondialisation avaient offert aux philanthropes un terrain propice pour étendre davantage leurs idéaux axés, désormais, sur des enjeux mondiaux, notamment l'enjeu climatique ainsi que les problématiques liées à la santé publique, le dénouement social et l'accès à l'éducation. (*Gueslin, 1998*)

Au fil du temps, donc, le concept avait évolué avec une approche caméléoniennes, s'adaptant aux contextes sociaux, économiques et culturels. Quoique les motivations se faisaient multiples, il persistait comme un atout majeur pour la prospérité sociale et le bien-être communautaire.

Après avoir scruter la définition et l'évolution du concept à travers les siècles, il est désormais le temps de projeter toutes ces connotations, par voie de parallélisme logique, et lui assigner une définition lucide dans le domaine nous concernant, en l'occurrence l'architecture. (*Duvoux, 2012*)

Toutes les caractéristiques inhérentes au concept de philanthropie tachent de façon systématique à bien viabiliser le champ pour la prospérité à l'individu au sein de sa société ; et ainsi de façon réciproque à ce que la société bénéficie dans le cadre du développement par les actions des citoyens. Dès lors, on pourra d'ores et déjà dire que la philanthropie architecturale est un concept qui tache à mettre ses atouts théoriques sont-ils ou pratiques, à savoir le design et la construction au service du développement social. Elle vise à assouvir les besoins spécifiques des

communautés et à leurs assurer toutes les commodités qui s'attachent à la notion de « bien vivre ».

En contemplant et en scrutant à travers cette définition qu'on a nous même donné à la philanthropie en architecture, on est directement foudroyés par le fait que les termes utilisés sont étroitement liés à un style architectural singulier qui incarne l'ensemble de ces valeurs philanthropiques et qui tache à confronter exactement les mêmes enjeux. Le style dont il est question ici est nommé l'architecture flexible. Qu'est-ce donc ce style architectural susceptible de nous procurer les réponses nécessaires aux problèmes auxquelles nous sommes confrontés dans cette recherche ?

4.2. L'architecture Flexible :

L'architecture flexible renvoie à une certaine ingéniosité dans l'imbrication entre pratique architecturale et recherche. C'est donc à la fois un concept théorique et pratique, qui offre une opportunité énorme de trouver les réponses à la problématique écologique ainsi que de multiples questionnements tournant autour d'autres sujets sociétaux contemporains. En effet, la constante mouvance de la société d'aujourd'hui contraste sévèrement avec la permanence intrinsèque de l'architecture et de l'environnement bâti, d'où la nécessité de ne plus penser suivant la logique architecturale dictant que « un bâtiment=un usage ». (*Bordas, 2021*)

Néanmoins ce style architectural est assez versatile, même dans sa dénomination. Aucune dénomination officielle ne lui fut attribuée ; d'ailleurs on la retrouve sous différents noms, parmi les plus récurrents on cite : architecture flexible, évolutive, réversible, dynamique, extensible, modulable, élastique, convertible, et bien d'innombrables autres termes pour l'indiquer.

La possibilité d'aménager ou de réaménager l'espace ainsi que l'aptitude d'étendre ou de réduire une surface donnée, constituent les leviers principaux de l'architecture flexible ; ces leviers permettent de parer à une potentielle obsolescence des besoins et goûts. (*Periàñez, 1993*)

Robert Kronenburg, un professeur de l'université Anglaise de Liverpool, est l'un des chercheurs éminents dans le champ de l'architecture flexible grâce à ces recherches et ses multiples publications ; évoquer ce style architectural nous impose, tout d'abord, de présenter ses dogmes et sa vision du sujet. Il affirmait dans l'ouvrage qu'il publiait en l'an 2007, que l'architecture flexible est un type d'architecture adaptatif plutôt que figé, altérable au lieu de limitatif, motrice plutôt que statique, communiquant avec ses usagers au lieu de les borner à des usages prédéfinis. Il continue sa description en disant qu'elle est initialement une architecture

transdisciplinaire et multifonctionnelle qui met en exergue des problématiques et des défaillances qui se rapportent à la conception architecturale d'une manière innovante. *“Bien que le changement conduise son développement, elle doit s'adapter de manière équilibrée aux théâtres permanents de l'activité humaine, à nos vies privées et publiques, chez nous ou dans la communauté, qui contribuent, l'une comme l'autre, à nous faire prendre conscience de la manière dont nous habitons le monde.”* (Kronenburg, 2007)

4.2.1. Origines de la typologie

Les origines de la typologie évolutive du bâti reviennent aux temps ancestraux de l'architecture. L'architecture vernaculaire fut par définition une typologie évolutive et flexible, par le biais de sa capacité à s'adapter aux différentes modalités de vie de ses occupants ainsi qu'à répondre à leurs besoins primitifs qu'ils soient physiologiques ou psychologiques. *« L'idée d'un habitat qui soit facilement adaptable aux changements dans la vie des humains qu'il héberge est naturellement très ancienne, comme toute idée-force — qui ne se laissent pas oublier. (...) elle se situe aux origines de l'habitation (...) l'habitat évolutif peut être considéré comme l'habitat des origines, au plan anthropologique. »* (Périanetz, 1993). À travers ces propos, le sociologue Espagnol estime inutile le fait de distinguer les termes « évolutif » et « habitat » vu que, selon lui, la formule évolutive, au sens large du terme, constitue le socle anthropologique de l'action d'habiter. Effectivement, en sachant que les premiers ancêtres du genre humains cherchaient d'une façon systématique, à travers leurs havres ensuite devenus constructions, à satisfaire des besoins ; ce qui s'aligne avec l'affirmation lancée par M.Périanetz. En effet, l'homme préhistorique, étant nomade en constant déplacement, motivé par le besoin et instinct de survie scrutait la nature dans la recherche d'une grotte, une caverne ou bien construisait des huttes éphémères érigées à partir d'ossement et de branchages, afin de se cantonner loin des intempéries et de se protéger des bêtes farouches. Faisant suite au progrès intellectuels, se manifestant par un savoir-faire plus aiguisé renforcé par une manipulation plus ingénieuse des matériaux, les besoins de l'homme devenu sédentaire se sont altérés. Il tachait désormais à se protéger des invasions d'autres communautés rivales en fortifiant ses édifices comme le témoigne l'exemple de la maison rurale médiévale dont laquelle fussent prévus des soubassements solides. Par la suite, le début du XVIII^e marquait l'éclosion de ce qu'on appelle le siècle des lumières qui fut caractérisé par l'enclin vers l'esthétisme et le confort au sein du bâtiment. Les architectes de l'époque commençaient alors à préconiser le traitement de façades

dans leurs conceptions et prendre en considération les facteurs de lumière qui contribuent à optimiser le degré du confort intérieur. (*Architecture*, 2020)

Donc, comme on l'indique toutes ces références, la flexibilité architecturale, dans le sens large du terme où elle vise à assouvir les différents besoins variés de l'homme, quoique restée dans un coin obscur ne date pas seulement d'aujourd'hui mais est une pratique séculaire. Raymond et Monique Fichelet, qui sont des architectes Français de renommée dans la matière d'architecture flexible grâce à leurs multiples recherches et publications, entérine que la maison domestique Japonaise constitue le pilier du mode de vie flexible.

La maison conventionnelle Nippone tire ses origines de l'essor du Bouddhisme dans l'archipel au VIII^e à partir de la Chine. Les modèles de temples bâtis par les artisans et charpentiers Chinois inspiraient profondément la construction des habitations pour les siècles suivants. Un corps principal central appelé « Moya » fut entouré, des quatre cotés par de larges galeries appelées « Hisashi », lui procurant la capacité d'extension. Les deux chercheurs français estiment que cette configuration représente les fondements de l'architecture réversible. (*Engel*, 1985)

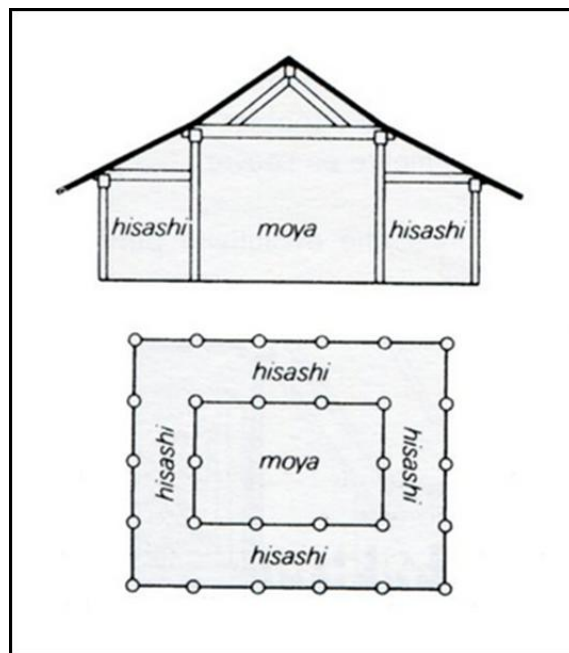


Figure 1 : Disposition typique des temples Bouddhistes, source : <http://mpzga.free.fr>

L'une des œuvres notables de l'archipel Japonais en cette matière est la « Minka ». Une maison traditionnelle construite à base de matériaux rudimentaires à l'image du bois, la paille et l'argile dont la forme simple et les rapports modulaire organisaient la structure. Une séparation versatile des espaces à l'aide d'écran amovible caractérisait ce bâtiment, ainsi qu'une connexion intime avec la nature à travers l'exploitation des matériaux verts dans une ossature permettant une transition fluide entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment. (*Périanes, 1993*)



Figure 2: La maison traditionnelle Japonaise Minka, source : <http://mpzga.free.fr>

Ces principes se sont cristallisés et évolués pour nous offrir le prototype de la construction traditionnelle japonaise. Des bâtiments contenant des espaces non limités par une vocation précise laissant la voie libre à l'utilisateur de se l'approprier en fonction de ses besoins et pratiques ; des panneaux coulissants ou amovibles, en papier appelés « Fusuma » constituant le système de cloisonnement résilient qui permet un réaménagement au gré de l'espace en question ; ainsi qu'un espace supplémentaire dénommé « Tatami » qui servait pour le maintien du mobilier et éléments que l'on déplace et qui, par ailleurs, faisait office d'un espace de repos, d'intimité ou de regroupement selon le besoin. (*Fleury, 2021*)



Figure 3 : illustration intérieure de la villa katsura, Kyoto, Japon, source : kanpai.fr

4.2.2. La flexibilité en théorie :

En cherchant à rassembler l'ensemble des principes régissant ce style architectural assez obscur, on rencontre d'une façon récurrente le nom d'Anna Maria Bordas. Il s'agit d'une architecte-ingénieur Franco-Latine qui, dans ces principes, est encline à un fonctionnalisme philanthropique, et qui parallèlement à sa pratique professionnelle, en ayant enseigné au sein de l'université de Paris-Val de Seine (France) avait accumulé dans sa besace de nombreuses recherches et projets étroitement liés au style architectural résilient. Elle affirme : « *Le concept d'architecture évolutive et réversible renvoie à une imbrication importante entre pratique architecturale et recherche. Nous ne pouvons plus continuer à fabriquer la ville de demain avec une logique architecturale d'un bâtiment=un usage. En effet, la permanence propre à l'architecture et du bâti contraste aujourd'hui avec la mouvance de la société contemporaine. Le patrimoine bâti ne peut pas être traité comme un objet de consommation. Parce qu'il mobilise trop d'énergies, de ressources et de temps.* » (Bordas, 2021) Comme l'indique cet extrait, Anna Maria Bordas et ses convictions sont extrêmement influencées par la théorie de « la société liquide » qu'avait formulé le sociologue et philosophe Polonais Zygmunt Bauman. Dans cet aphorisme, qu'il développait en un ouvrage intitulé « la vie liquide » il énonçait le concept de société liquide pour décrire l'ensemble des changements qui surviennent dans les sociétés contemporaines sous l'influence des phénomènes de mondialisation, du néolibéralisme ainsi que de l'essor technologique. Selon lui la société liquide se distingue par l'instabilité et le changement permanent (précisément les modifications dans les structures conventionnelles telles que la famille et le travail qui ne sont plus aussi solides que jadis), le consumérisme et l'obsolescence accélérée (il fait référence à la tendance accrue à la consommation effrénée : tout

devient rapidement et de façon systématique obsolète), ainsi que l'individualisme exacerbé (les exigences de flexibilité émises par la société imposent un écartement de l'altruisme social et un individualisme accentué).

A.M. Bordas insiste sur le fait qu'on ne peut plus se permettre de traiter le bâtiment tel un objet « jetable ». Selon elle, le changement précoce dans les besoins et en général dans les modalités de vie qui sont parallèlement accompagnées par une efficacité attendue dans les rendements du bâtiment nous met dos au mur et nous oblige à concevoir différemment. Dans l'optique de proposer la meilleure solution à cette confrontation entre pérennité architecturale et société mouvante, l'architecte Française avait désignée deux plans d'actions distincts. L'itinéraire à suivre est subjugué à l'intention et l'état des faits détenu par le concepteur. Le premier plan concerne l'action sur les constructions existantes tandis que le second est associé à ce qui est conception neuve. (Bordas, 2021)

En effet, et pour des motifs purement économiques, l'urgence réside dans la transformation de l'environnement bâti existant, qui à priori est obsolète ou bien le sera ultérieurement, en des bâtiments qui s'adaptent aux besoins actuels et futurs des usagers. Discerner le potentiel de flexibilité dont dispose le bâtiment existant constitue l'étape clé dans le processus d'assouplissement de ce dernier ; évidemment, le concepteur doit s'extirper des théories relatives au « lit de Procuste » et, au contraire, s'adapter et exploiter l'existant, en s'y adhérent en quelque sorte à la philosophie stoïque d'Epictète concernant la résilience « différencier ce qui dépend de ce qui ne dépend pas de nous, et agir en conséquent ». Pour cela, il est impératif, au premier abord, de décortiquer les composantes structurelles de la bâtisse sur laquelle se portera son intervention. Effectivement, le potentiel de flexibilité d'un bâtiment élevé est recelé sa structure. Par la suite, et après d'attentives délibérations, il se consentit à adopter un plan d'action qui peut différer d'une structure à une autre ; en distinguant ce qui est déplaçable de ce qui est figé, l'architecte aura la possibilité de réaménager l'espace en suivant ces données récoltées.

Le deuxième plan d'action, toujours dans l'optique de « philanthropiser » le domaine du bâtiment en ayant le recours au concept du bâtiment flexible, concerne la construction de bâtisses neuves. La finalité est d'ériger un environnement bâti, qui est à la fois, pérenne et adaptable à travers le temps. On y examinant de proche ces qualités visées, on constate qu'elles s'entremêlent jusqu'à renvoyer à une certaine tautologie ; étant que la pérennité escomptée

implique une fermeté atemporelle de l'infrastructure, et que cette dernière renvoie à une des connotations du concept d'adaptabilité. Ces deux derniers attributs ne peuvent être atteints qu'on ayant pleine connaissance des besoins présents et futurs des potentiels usagers de l'édifice à construire. Dans sa tentative de dénouer une telle thématique complexe et d'établir un schéma cadrant le procédé conventionnel suivi afin de « concevoir autrement », l'architecte Française s'est étayée sur les penchants récurrents qu'elle a pu identifier dans les différents projets d'architectes notables. Elle s'est aboutie à la distinction de deux principaux mécanismes suivis afin de projeter une construction évolutive. La différenciation des deux mécanismes en question repose sur plusieurs facteurs dont le principal est la marge de liberté laissée à l'appropriation de l'espace par son utilisateur. Le premier levier de la construction évolutive, elle l'a appelé les mécanismes directifs et déterminés, tandis que le second est relatif à des mécanismes ouverts et indéterminés.

4.2.2.1. Les mécanismes directifs/ déterminés :

A.M.Bordas l'avait appelé ainsi en faisant référence au degré de contrôle élevé, appliqué par l'architecte, que détient ce type de projet de construction flexible. En effet, dans cette catégorie, le concepteur daigne à avoir un contrôle presque entier sur sa conception, et ceci en prédéterminant les fonctions, les vocations, les usages bien que les aménagements des différents espaces englobés dans le projet, ainsi qu'en dirigeant les éventuelles modifications à y avoir, au futur, à son gré. La conception flexible s'adhérant à des mécanismes déterminés implique souvent des études préparatives acharnées avant toute projection spatiale. A travers une analyse préalable appuyée généralement par des données analytiques portant sur les comportements, les attitudes et les tendances de la catégorie d'utilisateurs à laquelle est destinée la conception en question. A l'issue de ces préparatives, qu'on peut baptiser « conception préliminaire », l'architecte dispose d'une base de données à la base de laquelle il se met à concevoir des espaces adaptés aux besoins et exigences des futurs utilisateurs. La « Herencia » de l'architecte Catalan José Antonio Coderch, quoiqu'elle ne fût jamais réalisée, demeure l'une des conceptions les plus notables manifestent une flexibilité suivant des mécanismes directifs et déterminés. En visant à aboutir vers une architecture flexible et honnête, capable d'une adaptation face aux changements dans les besoins de ses utilisateurs, tout en veillant à ne point négliger les dimensions fonctionnelles et esthétiques du projet, il conçoit des blocs d'habitations où chaque logement est

susceptible de modifier que ce soit ses dimensions ou bien sa configuration, et cela en interchangeant des espaces et des surfaces avec les logements qui lui sont adjacents, tant horizontalement que verticalement. Cependant, la marge de flexibilité est restreinte ; dans la conception de Coderch la spécification des espaces ainsi que leurs usages, présents ou futur, est la caractéristique principale. Les espaces sont conçus d'une sorte que même s'ils sont susceptibles de s'agrandir ou de se diminuer, ces évolutions restent relatives vu que deux espaces avec des usages aux antipodes ne peuvent en aucun cas s'interchanger entre eux : une chambre, quoique agrandie demeurera une chambre et ne peut se travestir en un séjour. (Bordas, 2021)

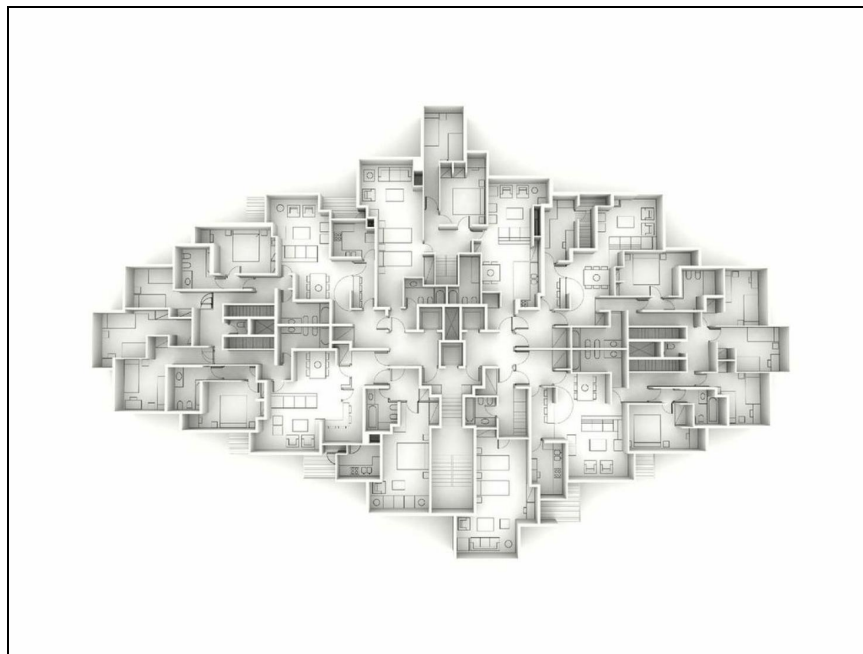


Figure 4: La herencia de coderch, source : dximagazine.com

4.2.2.2. Les mécanismes ouverts/ indéterminés :

Le deuxième type de mécanismes que l'architecte Française Anna Maria Bordas avait pu disséquer parmi les projets flexibles des architectes dont la mention est récurrente en ce domaine de conception, est ce qu'elle avait dénommée les mécanismes ouverts et indéterminés. Tel le cas du premier levier de l'architecture flexible qu'on a vu ci-dessus, la dénomination de ces mécanismes est indicatrice des caractéristiques et attributs de ceux-ci. En effet, si ces mécanismes sont appelés « ouvert et indéterminés » c'est parce qu'ils incarnent une dimension libérale accrue. Les propriétaires de ces constructions possèdent une marge conséquente pour s'approprier les espaces qui les composent. À travers des conceptions plus ouvertes, dont

l'architecte use des principes débridés tels qu'une spécification amoindrie des espaces qui peut s'étaler jusqu'à l'extrême où le concepteur se borne à ériger des espaces modulables dépourvues de toutes affiliation laissant ainsi la voie à l'appropriation libre de l'espace par son usager. En outre, les architectes prônant ce style de flexibilité, tendent généralement à mettre l'accent sur le système constructif, qu'ils préconisent afin de limiter les entraves inhérentes à quelques types de structures qui ne possèdent guère de possibilité de changement. La maison « Dom-Ino » fournit un archétype parfait d'une architecture flexible à base de mécanismes ouverts et indéterminés. Conçue par Le Corbusier entre 1914 et 1915, cette maison d'habitation incarne parfaitement le concept de flexibilité par le biais de son schéma structurel ouvert. Composée d'une ossature en béton armé en trois dalles horizontales soutenues par des poteaux et reliées par un escalier latéral, une configuration qui fut révolutionnaire en cette période rompant avec l'usage conventionnel des murs porteurs, elle détient une organisation spatiale fluide et résiliente. Effectivement, grâce à l'absence de murs porteurs la configuration intérieure des espaces peut être ajustée selon les besoins des occupants ce qui ouvre la voie à des aménagements personnalisables et réversibles s'adaptant aux nouveaux progrès technologiques et nouvelles tendances domestiques. Outre, le système modulable offre la possibilité de subdiviser ou d'agrandir les espaces à son propre gré, en fonction des évolutions dans les modalités de vie. Les cloisons et les dispositifs séparatifs sont susceptibles d'être déplacés ou bien supprimés sans porter atteinte à l'intégrité de l'ossature structurelle de l'édifice. (Bordas, 2021)

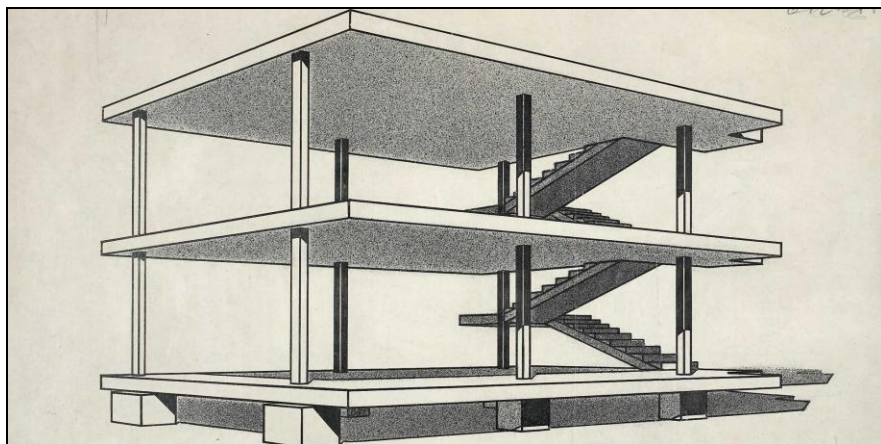


Figure 5 : La maison domino de Le Corbusier, source : <https://cdn.essentiels.bnf.fr>

4.3. Les dispositifs de résilience :

Après avoir exploré les différents mécanismes de flexibilité d'un bâtiment, il convient désormais de mettre en exergue les dispositifs concrets qui permettent de la mettre en œuvre. En effet, la résilience architecturale ne se borne pas uniquement à des principes théoriques abstraits, mais également sur des solutions innovantes s'adaptant aux usages évolutifs des espaces. En ce qui suit on explorera les divers dispositifs et configurations qui servent à assurer la flexibilité spatiale d'un édifice, en mettant l'accent sur leurs mises en œuvre, leurs rôles, leurs caractéristiques ainsi que leurs impacts respectifs sur la conception architecturale.

4.3.1. La modularité spatiale :

Le concept de modularité constitue le levier fondamental de l'architecture flexible. Dans un contexte où l'architecture doit répondre à des enjeux relatifs à la durabilité et la flexibilité tout en assurant la fonctionnalité, des bâtiments modulables reposant sur des systèmes structurels en trames régulières se présentent autant que dispositions salvatrices. La modularité spatiale, en structurant l'édifice en éléments standardisés et interchangeables, permet l'adaptation des usages face aux différents changements pouvant survenir, et ceci sans mutations majeures sur l'enveloppe globale. (*Safdie, 1967*)



Figure 6: prototype d'une conception modulaire, source : *maquetasarquitectonicas.es*

Le choix du système structurel est crucial afin de faciliter la mise en œuvre de la configuration. En ce qui suit, et en collectant les avis de quelques architectes et ingénieurs phares ayant repris le principe de la modularité architecturale à l'image de « Le Corbusier », on retrouve quelques recommandations relatives aux ossatures à adopter. Au premier lieu, les structures en acier se manifestent comme l'ossature la plus favorable offrant au bâtiment d'atteindre la totalité de son potentiel flexible. En effet, comme l'indiquent les caractéristiques intrinsèques des structures métalliques, les actions relatives à l'assemblage et le démontage des modules se trouvent plus faciles à effectuer et ainsi la reconfiguration spatiale plus aisée. En outre, le recours à l'usage du béton préfabriqué peut s'avérer plus rassurante, en offrant des infrastructures à la fois modulaires et robustes. Par ailleurs, l'utilisation de matériaux légers, dotés d'une résistance accrue et d'une force portante conséquente tel que le bois lamellé-collé procure une alternative durable et adaptable. De plus, la modularité est susceptible d'être consolidée à travers le recours à des dispositifs facilitant la réaffectation des espaces, à l'image des parois amovibles, l'utilisation des planchers techniques ainsi les façades réversibles. (*Safdie, 1967*)

La durabilité accrue, l'adaptabilité à long terme répondant aux enjeux sociétales et technologiques, l'optimisation des coûts à travers la standardisation des éléments composant le bâtiment, ainsi que multiples autres avantages que procure l'architecture modulaire font d'elle une réponse adaptable dans différents secteurs à l'image des bâtiments tertiaires, immeubles habitables, infrastructures industrielles, bâtiments hospitaliers, ...etc

Quoique la disposition modulable présente des défis quant à la nécessité d'une planification rigoureuse, grâce à l'intégration de schémas structurels adaptables et de matériaux innovants favorisant le réajustement des bâtiments face aux possibles transformations urbaines et sociétales, elle demeure autant qu'une réponse adéquate aux exigences de flexibilité et de durabilité à lesquels est confrontée l'architecture contemporaine. (*Corbusier, 1923*)

4.3.2. Le plan libre :

Le plan libre est un mode constructif, qui à côté des pilotis, le toit terrasse, la façade libre et la fenêtre en bandeau, figure parmi les cinq éléments de l'architecture moderne introduits par Le Corbusier en l'an 1926. Or, ce principe fut utilisé bien avant par plusieurs architectes à l'image du Germano-Américain Ludwig van Der Rohe qui était l'un de ses principaux précurseurs à travers son « *Haus aus Backstein* » (1923) qui est un ensemble de maisons en

briques organisés en plans libres et fluides. Le principe global du plan libre repose sur l'anéantissement du mode constructif classique basé sur les murs de refend (murs intérieurs porteurs), en le substituant par un recours à l'utilisation de poteaux en béton armé ou d'acier. Les architectes qui prônaient le principe du plan libre avait unanimement porté un jugement inculquant les systèmes constructifs à base des murs porteurs l'entrevoiant comme contraignant. En effet dans les constructions qui disposent d'une ossature en parois porteuses, les aménagements intérieurs sont assujettis à la disposition de ces murs non déplaçables. Le concept du plan libre vient afin d'y remédier au dilemme en remplaçant les murs de refend par des poteaux porteurs traversant verticalement l'ensemble de la bâtisse, sur lesquelles sont suspendues les dalles des différents planchers. Les murs intérieurs, servant à la répartition des fonctions, sont facultatifs et leur présence est subordonnée au choix de l'utilisateur, ou bien, dans plusieurs cas, sont remplacés par des parois amovibles. (*Journal, s.d*)

Le plan libre présente plusieurs avantages. D'abord, l'élimination de la contrainte des murs porteurs, qui d'ordinaire occupent le même endroit sur tous les niveaux, permet d'avoir une variété assez riche de planchers et ainsi une facilité d'aménagement des espaces intérieurs : l'occupant ou le propriétaire aura la possibilité de déplacer ou de réaménager des pièces sans avoir le recours à une intervention lourde sur la structure. En outre, le plan libre présente un avantage d'ordre économique en raison des moindres surfaces fermées, par rapport aux dispositions à l'aide de murs de refends, ainsi qu'à la possibilité d'exploiter la quasi-totalité de l'aire dont on dispose grâce à l'usage de l'ossature en poteaux. Par ailleurs, ce mode constructif libre permet une perméabilité plus aisée dans tous les espaces englobés dans l'édifice à l'égard de la lumière, le soleil et l'air, offrant ainsi l'opportunité d'avoir des pièces plus salubres et plus disposés à être régulés par l'utilisateur lui-même selon ses besoins.

Le plan libre est l'un des dispositifs phares du mode de vie résilient, d'autant plus qu'il est susceptible d'être utilisé pour tout type de bâtiment. (*Journal, s.d*)

4.3.3. Les parois amovibles :

Comme on l'avait aperçu en évoquant le développement historique de la construction évolutive, l'utilisation des parois amovibles comme dispositif de flexibilité date du VIII^e siècle au Japon, à l'époque de l'empire Nippon, à travers l'usage des panneaux coulissants tantôt en papier tantôt en bois appelés « Fusuma ». Dans le vieux continent, le recours à ces dispositifs ne voit le jour qu'à l'époque de la Renaissance, quoique leur usage fut restreint en se bornant aux

palais et maison nobles afin d'y optimiser la qualité de la lumière et de la ventilation. Vers la fin du XIXe et début du XXe siècle, avec l'avènement de nouvelles structure légères au domaine de la construction, l'utilisation du dispositif des murs mobiles commençait à gagner du terrain en s'imposant de plus en plus dans les aménagements des espaces de travail et des logements, sous forme de panneaux coulissant et pliants. Tandis qu'à la fin du siècle précédent, le recours aux parois amovibles s'est généralisé sur tous le secteur du bâtiment, grâce notamment à l'essor du mouvement moderne qui avait taché à promouvoir l'idée de l'espace fluide organisé avec une structure modulable. Désormais, et avec l'essor technologique ainsi que les enjeux cruciaux à lesquels est confrontée la construction, le dispositif s'est vu intégrer des techniques innovatrices faisant de lui non seulement un moyen ingénieux pour aménager son espace, mais également un atout majeur dans répondant aux exigences contemporaines en matière de durabilité et de confort de l'occupant au sein de son espace. En effet, les dernières années ont vu l'émergence des parois amovibles intelligentes, qui en plus des matériaux isolants thermiques et acoustiques, intègrent des écrans numériques ainsi que des systèmes motorisés et automatisés permettant le cloisonnement dynamisé des espaces. En outre, s'adhérant aux enjeux du développement durable, les parois amovibles se voient constitués par des « matériaux verts » à l'image du bois reconstitué, le verre intelligent ou bien les matériaux composites recyclés. (*Development, 2021*)

La variété des enjeux et des finalités pour lesquelles on fait recours à ce dispositif avait conduit à créer une variété dans les formes qu'on lui affecte ; chacune sert une finalité. En effet, il existe ce qu'on appelle panneaux de type « accordéon » ou bien les panneaux coulissants qui sont fabriqués sur mesure et entièrement personnalisables. Ceux-ci, permettent une personnalisation plus accentuée de l'aménagement et une réponse plus optimale à des besoins spécifiques en facilitant l'agencement modulaire des espaces en fonction de l'usage escompté. Par ailleurs, des parois appelées « rétractables » servent à offrir des solutions polyvalentes au sein de l'édifice, en régulant la transition entre solidité et transparence pour redéfinir les espaces selon les besoins. Cette diversification formelle offre une multitude de possibilités esthétiques. La disponibilité de diverses solutions de parois amovibles à adopter, aux apparences et caractéristiques différentes, procure un rayon d'impact plus conséquent dans l'optique d'assouvir les besoins relatifs à la modularité, la fonctionnalité, le confort visuel et thermiques, ...etc. (*Development, 2021*)

Ce dispositif, donc, à la fois durable, flexible et esthétique, et qui est susceptible d'être exploité dans tous les secteurs du bâtiment que ce soit l'habitation, le tertiaire ou l'industriel, englobe une constellation de bienfaits qui font de lui un acteur incontournable de l'architecture flexible.

4.3.4. Les espaces multi-vocationnels :

La configuration spatiale de la « pièce supplémentaire » est une approche qui procure une polyvalence accentuée, ce qui permet aux infrastructures d'anticiper et de s'adapter aux éventuelles transformations qu'elles soient familiales, professionnelles ou personnelles. Ceci constitue une réponse explicite aux deux leviers principaux de l'architecture résiliente en l'occurrence flexibilité et élasticité. (*Solidaire, 2020*)

Il s'agit d'une disposition plutôt spatiale et conceptionnelles qu'un dispositif physique. En amont, elle se manifeste, dans un plan architectural, autant qu'une surface additionnelle tantôt non aménagée, tantôt pourvue d'une multitude de vocations. L'ajout d'une surface supplémentaire à l'égard du programme initial du projet nécessite une marge d'emprise relativement conséquente, c'est pour cela que cette technique est, surtout, préconisée dans les projets disposant d'une surface assez importante. (*Solidaire, 2020*)

Les avantages qu'offre l'intégration d'un espace supplémentaire, comme dispositif d'adaptabilité, sont multiples. D'abord, une adaptabilité aux changements. En effet, la pièce ou l'espace additionnel ayant une vocation initiale peut voir modifier son utilisation et cela en fonction de l'évolution dans les situations familiales ou professionnelles. En outre, en facilitant la résilience face aux fluctuations sans avoir le recours à des travaux lourds, cela fait perdurer et prolonger la durée de vie de l'équipement et ainsi assurer sa durabilité. Ces différents bienfaits concourent à un avantage économique précieux. Effectivement, grâce à cette disposition, l'infrastructure dotée d'une telle flexibilité détient une valeur pécuniaire augmentée. (*Architecture*), *Architecture évolutive / flexible, 2015*)

Néanmoins, la bonne mise en œuvre de ce dispositif nécessite le respect de quelques prescriptions d'ordres techniques et architecturales. Entre autres, on cite la structure porteuse en poteaux-poutres qui, accompagnée de cloisons amovibles permettant la reconfiguration des espaces en fonction des besoins, constitue le système structurel le plus avantageux à générer une

grande modularité des espaces intérieurs. Par ailleurs, les surfaces additionnelles, à consacrer au futur pour des fins multi-vocationnelles, doivent être dotées d'installations électriques et de plomberies adaptables afin qu'elles puissent remplir pleinement leur rôle. (*Architecture*), *Architecture évolutive / flexible*, 2015)

La résidence du Lac à Bordeaux (France), est un prototype parfait d'une conception s'étayant complètement sur la polyvalence vocationnelle d'un espace, afin d'assurer la résilience du projet. Conçu par l'architecte Bruno Mollet en l'an 2020, le projet fut désigné en Mars 2022 comme lauréat de la distinction « Engagés pour la qualité du Logement de demain » décernée par le Ministère de l'habitat et le Ministère de la culture Français. Il s'agit d'un ensemble de 132 logements, dont 60 disposent d'une « pièce supplémentaire » non aménagée d'une surface égale à 10m². L'exploitation de cette dernière est laissée à la discrétion des futurs occupants qui l'adapteront à leurs propres besoins. Chambre supplémentaire, espace de détente ou loisir, bureau ,...etc l'occupant possède une infinité de choix manifestant ainsi le rôle prépondérant que peut assurer la disposition de la pièce supplémentaire dans une architecture axée sur l'évolutivité et la flexibilité. (*tous*, 2025)

Un autre archétype, toujours en France, se démarque par l'exploitation de la même disposition pour des fins de résilience. Il s'agit du projet nommé « Lona+ », qui est un ensemble de 55 Logements expérimentaux et locatifs sociaux dans la ville de Nantes. Ils sont conçus par l'architecte Delhay Sophie vers l'an 2008. Ce projet se distingue par une pièce de plus dans ces plans. L'espace en question n'est pas intégré dans le logement lui-même mais est en annexe, ce qui engendre une disposition qui permet à trois logements d'utiliser la pièce supplémentaire. L'architecte visait à travers cette disposition d'octroyer une liberté d'appropriation accentuée aux habitants ainsi qu'une polyvalence des espaces. (*Delhay*, 2025)



Figure 8: Photographie du projet Lona,
source : *sophie-delhay-architecte.fr*



Figure 8 : Plan de trois logements, différentes variations
d'appropriation et d'association de la pièce
additionnelle, source : *sophie-delhay-architecte.fr*

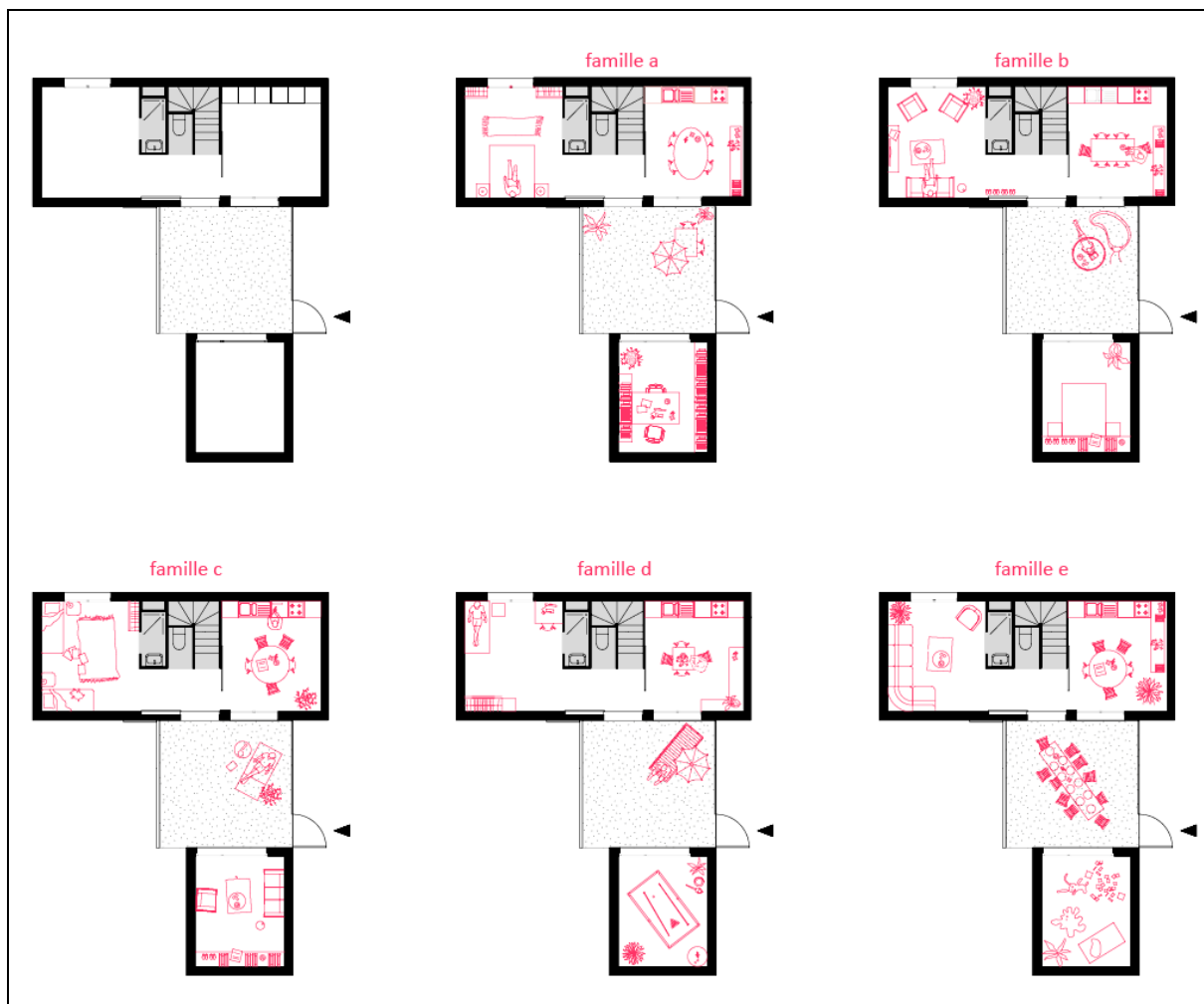


Figure 9 : différentes possibilités d'appropriation des espaces de logements proposés par l'architecte, source : *sophie-delhay-architecte.fr*

4.3.5. La double hauteur :

Parmi les dispositions architecturales répondant le plus favorablement aux enjeux d'évolutivité, la double hauteur se manifeste autant qu'une solution très efficace. Il s'agit d'une configuration dont l'espace se caractérise par une hauteur sous-plafond qui équivaut à deux niveaux standards créant ainsi un volume intérieur assez généreux et ouvert pour son aménagement et transformation en fonction des besoins changeants de ses utilisateurs. (Habraken, 1998)

La configuration dont on vient de faire la présentation, procure d'innombrables possibilités d'adaptations des infrastructures face aux fluctuations dans les exigences, sans faire recours à des modifications majeures dans les systèmes structurels. Effectivement, la disposition de la double hauteur est perçue comme une possibilité ou bien une marge d'extension de la surface utile dans le sens vertical. La présence d'une double hauteur permet la création d'espaces ou carrément d'étages intermédiaires en emplissant soit complètement ou partiellement la zone initialement conçue en double hauteur. (Kronenburg, 2007)



Figure 10 : Prototype d'une conception en double hauteur, source : leparisien.fr

En addition à ces avantages au service du concept d'évolutivité, la double hauteur favorise une luminosité accrue au sein de la bâtisse. En effet, en permettant l'utilisation de grandes ouvertures, elle s'expose à la lumière naturelle optimisant ainsi les conditions intérieures en termes de confort visuel et thermique. En outre, elle offre à l'espace une qualité spatiale appréciable par le biais d'un volume intérieur exacerbé donnant une impression de grandeur et d'ouverture. Par ailleurs, la double hauteur permet une adaptation plus haletante face aux éventuelles transformations des normes et des réglementations relatives à l'accessibilité et la modularité. Elle se distingue également par le fait qu'elle constitue une solution efficace pour divers champs, en l'occurrence le secteur résidentiel, tertiaire ou industriel. (Kronenburg, 2007)

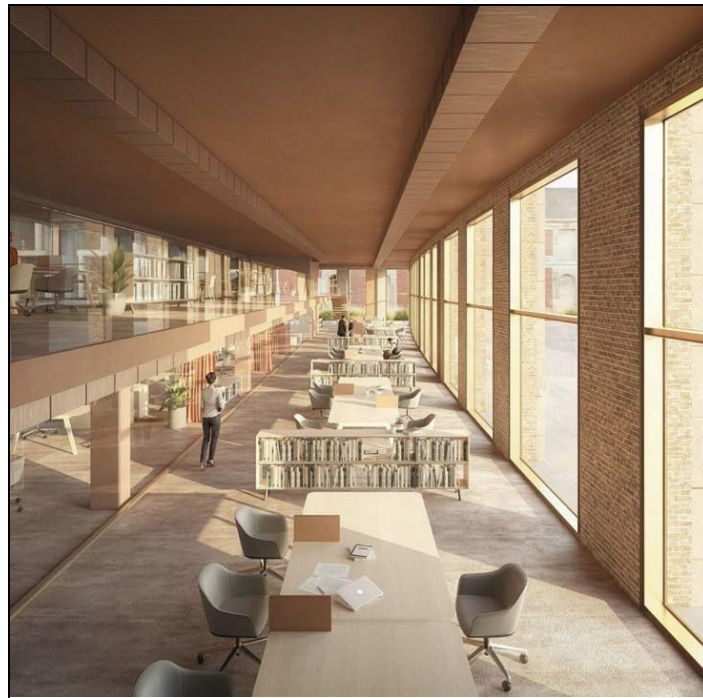


Figure 11: Exploitation des grandes baies dans une conception en double hauteur, source : *leparisien.fr*

Néanmoins, afin que cette configuration puisse remplir pleinement son rôle comme pilier de l'architecture flexible, la prise en compte d'un nombre de considérations est importante. Entre autres, la structure poteuse en poteaux-poutres qui représente le système le plus propice à une modularité intérieure ; la gestion acoustique des larges espaces qui peut s'avérer problématique, en prévoyant des solutions adaptées à l'image des dispositifs de correction acoustique ainsi que l'usage des matériaux absorbants. Anticiper la modularité des réseaux techniques, par ailleurs,

peut être un élément vital pour la bonne mise en œuvre de la configuration de la double hauteur. Atteindre la modularité des installations électriques, de chauffage et de ventilation permet de reconfigurer l'espace à son gré, sans aucune contrainte notable. (*Kronenburg, 2007*)

4.4. Synthèse : Architecture Flexible : Avantages, défis et enjeux :

L'architecture évolutive offre de nombreux bénéfices importants, dont la durabilité écologique, l'efficacité économique et la capacité de résistance aux transformations. Elle favorise l'aménagement des bâtiments pour de nouvelles utilisations sans démolition, ce qui diminue la consommation de ressources et la génération de déchets, contribuant ainsi à la durabilité écologique. Par ailleurs, les bâtiments évolutifs offrent la possibilité d'être adaptés ou agrandis à un coût réduit, évitant ainsi des dépenses majeures liées à de nouvelles constructions, ce qui est particulièrement avantageux dans des contextes en perpétuel changement. Ces organisations sont également plus aptes à réagir face à des changements inattendus, qu'ils soient de nature démographique, technologique ou climatique, augmentant ainsi la capacité de résistance des communautés. Néanmoins, malgré ses multiples bénéfices, l'architecture évolutive pose des défis qui impliquent une préparation rigoureuse. L'intégration de systèmes modulaires et de matériaux particuliers peut entraîner des coûts initiaux plus importants. En outre, l'implémentation de ces structures nécessite une compétence technique poussée pour garantir la compatibilité et le rendement des divers modules et systèmes. Finalement, l'adoption culturelle par les utilisateurs et les communautés est cruciale, car elle nécessite parfois une sensibilisation et une éducation adéquate aux notions d'espaces polyvalents et modulaires.

A l'issue des deux grands contingents dont on vient de faire la présentation, à savoir l'essor technologique et la philanthropie architecturale, désormais, il convient de rentrer dans le vif du sujet autour duquel tourne cette recherche, en l'occurrence la gestion énergétique au sein des complexes de production industriels. Que représente le terme énergie dans un complexe de production ? Quels sont les mécanismes adoptés dans l'exploitation de l'énergie et comment évalue-t-on les performances énergétiques ? Comment les deux volets précédents contribuent-ils à l'optimisation des consommations énergétiques ? sont les questionnements à lesquelles on tâchera de répondre avec la plus grande rigueur, dans la partie suivante de ce travail.

5. Gestion de la consommation énergétique dans les complexes de production intelligents :

L'énergie représente l'élément primordial assurant le fonctionnement d'un complexe industriel. La bonne performance énergétique au sein de l'infrastructure industrielle permet de satisfaire et de répondre aux enjeux cruciaux auxquels ils sont confrontés (voir chapitre précédent). Dans la partie qui suit, on essaiera d'éclaircir la notion de l'énergie, le mécanisme de son exploitation dans les complexes de production ainsi que les différentes alternatives susceptibles de faire déboucher vers une consommation énergétique optimale.

5.1. C'est quoi l'énergie :

L'étymologie du terme énergie remonte aux philosophies anciennes. En Latin « energia » et en grec « energeia » signifient la force en action. En Physique, l'énergie est la représentation de la capacité d'un élément ou d'un système à générer une transformation d'état ou à effectuer un travail. Conformément au principe de conservation de l'énergie, elle se manifeste sous différentes formes et peut être convertie d'une forme à une autre, mais elle ne peut être ni créée ni détruite. Elle est incrustée dans notre environnement et est responsable de toutes les transformations et changements physiques et chimiques qui s'effectuent par les lois naturelles et sous l'action humaine. Outre qu'en Physique, où elle est mesurée en Joule(J), son action s'étend sur plusieurs domaines scientifiques, entre autres la thermodynamique, la mécanique et l'électricité. (Halliday, 2014)

5.1.1. Différents types d'énergie

L'énergie, selon son origine, se divise en deux grandes familles : l'énergie primaire et l'énergie secondaire.

Énergie primaire : Le type d'énergie appelé énergie primaire renvoie à celle provenant directement de sources naturelles sans qu'elle subisse une transformation préalable. Elle inclut les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, biomasse). Ces formes d'énergie existent à l'état brut et nécessitent des processus de conversion pour être utilisées dans l'industrie ou le secteur domestique. (Halliday, 2014)

Énergie secondaire : on utilise l'expression énergie secondaire pour indiquer toute énergie issue de la transformation de l'énergie primaire. Par exemple, le pétrole brut raffiné donne naissance à des carburants comme l'essence ou le diesel, et l'électricité est produite à partir du charbon, du gaz naturel ou des énergies renouvelables. Les altérations apportées à ces énergies sont dans la finalité de les adapter aux besoins spécifiques des consommateurs et d'optimiser leur utilisation. (Halliday, 2014)

5.1.2. Sources d'énergie :

Énergies fossiles : Ces énergies proviennent de la dégradation de substances organiques sur une période s'étalant sur des millions d'années. Cela comprend le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Malgré leur large utilisation dans l'industrie et la production d'énergie, leur combustion génère des gaz à effet de serre qui participent au réchauffement climatique. (Halliday, 2014)

Énergies renouvelables : Ces sources d'énergie sont issues de processus naturels continus. Elles comprennent l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles, elles sont inépuisables à l'échelle humaine et ont un impact environnemental réduit, bien que leur production puisse nécessiter des infrastructures coûteuses. (Halliday, 2014)

Énergie nucléaire : Produite par la fission des atomes d'uranium ou de plutonium, l'énergie nucléaire génère une grande quantité d'électricité sans émissions directes de CO₂. Cependant, elle soulève des défis en matière de gestion des déchets radioactifs et de sécurité des installations. (Halliday, 2014)

5.1.3. Formes d'énergie :

Thermique : C'est l'énergie associée à la chaleur. Elle est générée par la combustion de combustibles fossiles, l'énergie solaire ou les réactions nucléaires. Ce type d'énergie est couramment employé dans les procédures industrielles pour réchauffer des composants, produire de la vapeur ou générer de l'électricité par le biais de turbines à vapeur. (Halliday, 2014)

Électrique : L'électricité est générée en transformant d'autres types d'énergie, tels que l'énergie mécanique dans les alternateurs ou l'énergie chimique dans les batteries. Cette forme d'énergie

est la plus couramment employée dans le secteur industriel, grâce à sa simplicité de transport et de transformation en d'autres types utiles. (Halliday, 2014)

Chimique : Cette énergie est emmagasinée dans les liaisons chimiques des molécules et se libère lors de réactions chimiques, telles que la combustion des hydrocarbures ou l'usage de batteries et piles. Elle joue un rôle crucial dans les secteurs chimique et pharmaceutique, de même que dans la fabrication de carburants. (Halliday, 2014)

Mécanique : C'est l'énergie liée au déplacement des objets. Elle englobe l'énergie cinétique (provenant du mouvement) et l'énergie potentielle (provenant de la position). Elle est utilisée dans des machines, des véhicules et des systèmes hydrauliques. (Halliday, 2014)

Rayonnante : Les ondes électromagnétiques, telles que la lumière visible, les rayons infrarouges et ultraviolets, véhiculent cette énergie. L'énergie solaire est un exemple prépondérant d'énergie rayonnante, exploitée pour générer de l'électricité ou réchauffer des édifices. (Halliday, 2014)

5.2. Notions clés :

5.2.1. Procédées de transformation énergétique : trigénération et hydrogène bas carbone

La trigénération est une technique qui permet de produire conjointement de l'électricité, de l'énergie mécanique et de la chaleur à partir d'une source d'énergie primaire, le gaz naturel étant souvent celle-ci. Ce dispositif utilise différentes sources d'énergie pour obtenir des performances optimales, contribuant de cette manière à la réduction de consommation énergétique et à la diminution des émissions de gaz à effet de serre. En même temps, l'hydrogène à faible teneur en carbone, employé dans différents processus industriels comme source d'énergie, est principalement fabriqué à partir de ressources fossiles, produisant ainsi des émissions de CO₂. Cependant, des options plus respectueuses de l'environnement, comme la production d'hydrogène vert par électrolyse alimentée par des énergies renouvelables, sont actuellement en cours de développement. Même s'il est prometteur, l'hydrogène vert reste cher et ne constitue qu'une part minime de la production mondiale actuelle. ((IEA), *Energy Technology Perspectives*, 2020)

5.2.2. Complexes de production intelligent : quelles énergies ?

Dans les usines intelligentes, l'optimisation de la consommation d'énergie est basée sur un mélange de ressources variées et de technologies de pointe. Les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire, figurent parmi les sources d'énergie majeures. Elles offrent aux installations la possibilité de produire une portion de leur électricité de façon autonome, diminuant ainsi leur recours aux combustibles fossiles. La biomasse offre, de son côté, une solution de rechange aux énergies fossiles, en particulier pour les secteurs industriels requérant des températures hautes. Dans le même temps, la technologie de cogénération qui produit de l'électricité et de la chaleur en même temps à partir d'une seule source énergétique, optimise la performance énergétique générale des installations industrielles. L'hydrogène décarboné, généré par l'électrolyse de l'eau alimentée par des sources d'énergie renouvelables, trouve de plus en plus d'application comme matière première dans divers secteurs industriels tels que la sidérurgie et la chimie. Cela contribue à diminuer les émissions de CO₂. L'électrification des processus, grâce à l'adoption de systèmes électriques tels que les fours ou chaudières électriques, peut aussi réduire les émissions et optimiser l'efficacité énergétique des équipements industriels. Pour finir, les technologies de capture, d'exploitation et de stockage du CO₂ (CCUS) proposent des réponses pour récupérer le dioxyde de carbone produit par les processus industriels, ce qui permet de le stocker ou de l'utiliser dans d'autres domaines. L'incorporation de ces outils et technologies au sein des complexes industriels intelligents contribue à une production plus performante et pérenne, conforme aux buts de diminution des émissions de gaz à effet de serre. ((ADEME), 2022)

5.3. Gestion des consommations énergétiques au sein des complexes de production intelligents :

Dans un contexte où les industries consommatrices d'énergie se trouvent dans l'obligation de concilier entre rendement économique et responsabilité environnementale, la priorité et première tâche doit consister en l'exploitation des outils permettant d'estimer de gérer et d'analyser les flux énergétiques. Ces dispositifs, appelés systèmes de gestion des consommations énergétiques, ne disposent guère de pouvoir pour intervenir d'une manière directe sur la consommation, or ils facilitent la collecte de données et permettent de se procurer une vision translucide sur les usages énergétiques, offrant une meilleure base pour la prise de décision. (écologique), 2021)

La gestion énergétique est un levier indispensable à préconiser, contribuant à accentuer la concurrence et la compétitivité industrielle en atténuant les pertes et les dilapidations, en anticipant les dérives de consommation et en permettant une maintenance plus aisée des différents équipements. Elle constitue également, un atout majeur dans l'optique d'adoucir l'empreinte carbone et d'atteindre les objectifs du développement durable. (*écologique*), 2021)

Entes autres ces dispositifs informatifs, qui interviennent pour détecter les postes de consommation à préconiser, cernent les lacunes et régissent des indicateurs de rendement énergétique, on cite ce qui suit :

5.3.1. Energy Management System (EMS)

Dans une infrastructure industrielle, l'Energy Management System (EMS) constitue le mécanisme central de contrôle énergétique. Son rôle consiste en la collecte et le groupement des données provenant des systèmes d'électricité, de gaz, d'alimentation en eau, d'air comprimé et autres ...etc, pour ensuite les restituer en tant que tableaux de bord et d'indicateurs. En plus qu'il possède la capacité de générer des rapports servant pour les audits énergétiques, l'EMS accorde la possibilité de la supervision, en temps réel, de la cadence que suit la consommation énergétique, et par conséquent, en cas de dérives dans le fonctionnement, de diffuser des alertes. (*Capehart*, 2020)

5.3.2. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)

“Supervisory Control And Data Acquisition” s'agit d'un système de supervision industrielle qui facilite la tâche de surveiller et de gérer, instantanément, les différents processus industriels. Il incorpore des systèmes de gestion énergétique, en rassemblant les données provenant à partir des capteurs et automates dispersés à travers l'infrastructure et en les altérant à travers des interfaces graphiques. Ce système possède un atout majeur qui le distingue des autres types de systèmes de gestion des consommations énergétiques, en l'occurrence son habileté à contrôler d'une manière simultanée les flux énergétiques ainsi que les processus de production. (*Mutiu Shola Bakare*, 2025)

5.3.3. GTC/GTB (Gestion Technique Centralisée / Gestion Technique du Bâtiment)

La Gestion Technique du Bâtiment est composée de dispositifs spécialisés dans la gestion de l'énergie relative aux infrastructures industrielles et tertiaires à l'image du chauffage, ventilation, climatisation, éclairages et autres services. Le rôle principal de ces dispositifs est d'assurer la gestion et la Surveillance énergétique des bureaux, ateliers et espaces techniques. (MDPI, 2021)

5.3.4. Smart meters et capteurs IoT :

Les capteurs intelligents et les dispositifs connectés occupent une position essentielle dans la collecte précise et en temps réel des informations de consommation. Positionnés sur les points de distribution ou directement sur les appareils, ceux-ci offrent une mesure exacte et constante. (MDPI, 2021)

5.3.5. Tableaux de bord énergétiques (Energy Dashboards) :

Ils servent d'interface utilisateur pour les systèmes de gestion. Ils offrent une représentation résumée des consommations à travers des graphiques, des histogrammes et des indicateurs principaux. Ils rendent plus aisée la prise de décisions et l'instauration d'actions correctives. (MDPI, 2021)

5.4. L'optimisation des consommations énergétiques au sein des complexes de production intelligent :

Le contexte actuel exigeant des grandes industries mondiales de réduire leur impact environnemental tout en demeurant compétitif, se borner à des systèmes de gestion surveillant la consommation énergétique ne suffit plus, agir concrètement pour la réduire est une nécessité absolue. Les systèmes d'optimisation des consommations énergétiques sont des dispositifs qui permettent d'intervenir d'une manière directe sur les équipements et les procédés, afin de reconfigurer les usages en fonction des besoins réels et des conditions extérieures. Le principe d'optimisation énergétique consiste, alors, à un procédé d'adaptation des consommations en les subordonnant aux besoins réels de l'équipement, aux conditions météorologiques, aux tarifs énergétiques, et autres, ...etc. il offre également, l'opportunité de valoriser les énergies

renouvelables produites au niveau local ainsi que d'incorporer davantage les prérogatives procurées par le stockage et la flexibilité énergétique. (Capehart B. L., 2020)

Selon les stratégies d'action ainsi que les secteurs d'intervention, on peut distinguer de multiples catégories de systèmes d'optimisation qui sont exploités au sein des complexes industriels de production. Parmi ceux-ci, on retrouve :

5.4.1. Systèmes de régulation et d'automatisation industrielle (Automates PLC / DCS)

Les procédés industriels en temps réel sont gérés à l'aide des automates programmables industriels (PLC) et des systèmes de contrôle distribués (DCS). Ils ont pour fonction de contrôler la vitesse des moteurs, la température, la pression ou le débit, en se basant sur les directives énergétiques et les circonstances d'exploitation. Ces dispositifs sont indispensables pour prévenir les excès de consommation et ajuster les usages aux exigences du moment. (Yadav, 2020)

5.4.2. Logiciels d'optimisation énergétique

Ces programmes exploitent des modèles de simulation ainsi que des algorithmes pour identifier les stratégies de consommation les plus performantes. Ils intègrent les spécificités des appareils, les coûts énergétiques, les prévisions climatiques et les restrictions de production pour suggérer ou mettre en œuvre automatiquement des programmes de charge optimisés.

Quelques programmes sont en mesure d'effectuer une gestion prédictive en prévoyant les demandes énergétiques à venir et en modifiant le fonctionnement des équipements en réponse. (Yadav, 2020)

5.4.3. Systèmes de gestion de la demande (Demand Side Management – DSM)

Le DSM vise à moduler les usages d'énergie en tenant compte des pics de demande et des coûts de l'énergie. Les systèmes DSM déplacent les consommations non prioritaires, ajustent les charges ou font appel à des sources d'énergie alternatives pour minimiser la demande durant les moments critiques. (Mutiu Shola Bakare, 2025)

Ces dispositifs dans les installations industrielles favorisent la réduction des coûts énergétiques et diminuent la dépendance vis-à-vis des réseaux lors de périodes de demande intense. (Mutiu Shola Bakare, 2025)

5.4.4. Stockage d'énergie et pilotage de la flexibilité

L'utilisation de systèmes de stockage d'énergie, qu'ils soient basés sur des batteries industrielles, des réservoirs thermiques ou d'air comprimé, permet de sauvegarder l'énergie excédentaire pendant les périodes de faible demande et de la libérer durant les pics de consommation. Des logiciels d'optimisation contrôlent automatiquement ces systèmes pour déterminer les meilleurs moments de stocker et d'utiliser l'énergie. (Dafeng Zhu, 2022)

Cette souplesse énergétique facilite une gestion optimisée des variations de production et de consommation, surtout en ce qui concerne les énergies renouvelables intermittentes. (Dafeng Zhu, 2022)

5.4.5. Smart Grids et systèmes de gestion d'énergies renouvelables intégrés

Dans les complexes industriels intégrant des énergies renouvelables locales (photovoltaïque, biomasse, éolien), des systèmes de gestion spécifiques assurent l'optimisation de la production et de la consommation sur site. Ces dispositifs coordonnent les apports d'énergie renouvelable, le stockage et la consommation pour minimiser le recours à l'énergie du réseau. (Mutiu Shola Bakare, 2025)

5.4.6. Maintenance prédictive et supervision via Intelligence Artificielle

Les systèmes d'analyse prédictive utilisent les informations provenant des capteurs et des dispositifs de gestion pour prévoir les défaillances et les anomalies de consommation. Avec l'aide de l'intelligence artificielle, ils identifient les irrégularités et initient des interventions de maintenance préventive ou corrective avant que des surconsommations ne se produisent. (Yusuff, 2025)

5.5. Amélioration des performances énergétiques à travers les dispositifs architecturaux :

Après avoir présenté génériquement les notions rudimentaires ainsi que le jargon relatif à la thématique énergétique, le temps est venu, dans ce qui suit, de justifier le choix de solutions qu'on avait adopté dès le prélude de ce travail en énumérant les divers mécanismes à travers lesquels les différentes solutions que nous avons proposé dans le prélude de cette recherche œuvrent au service de l'optimisation des performances énergétiques. Tel on s'est consenti, deux grandes branches de « remèdes » qui agiront en collaboration, furent prélevés. Evidemment,

l'exposition sera entamée par le volet architectural. En prenant à part chacun des échantillons de dispositifs flexibles, cités dans la partie précédente, on mettra en exergue les divers atouts offerts par ceux-ci dans le cadre de l'optimisation des consommations énergétiques au sein d'une infrastructure à caractère industriel.

Dans un contexte industriel caractérisé par des consommations énergétiques à foisonnement, la modularité spatiale, reposant sur des schémas structurels standardisés, constitue une opportunité majeure dans l'optique de minimiser la dilapidation énergétique. La disposition spatiale modulaire permet à l'infrastructure industriel une adaptation plus aisée aux évolutions des processus de production, aux changements et mutations en matière d'effectif et d'activités. En ajustant, donc, les espaces qui lui sont propres en fonction des besoins réels, les déperditions énergétiques s'avèrent plus infime. En effet, à travers les possibilités de réaménagement et de reconfiguration, dans la finalité d'améliorer l'efficacité des flux de production par exemple, qu'octroie cette disposition structurelle, la réduction des consommations énergétiques relatives aux zones chauffées, ventilées ou climatisées, devient beaucoup plus envisageable. Par ailleurs, comme on l'avait souligné, à l'image des cloisons mobiles à isolants intégrés, la configuration modulaire permet l'incorporation de solutions passives de régulation thermiques améliorant la performance énergétique d'un espace donné sans intervention majeure sur l'enveloppe globale de l'édifice. Cela se manifeste tel un attribut majeur, car la gestion énergétique améliore grâce à la résilience structurelle permet d'éviter les surdimensionnements pouvant survenir dans la conception des différentes installations techniques (chauffage, ventilation, éclairage, ...etc.) (Abdullah Al Masri, 2025)

Le second dispositif que l'on avait traité s'agit du plan libre. Reposant sur le principe d'élimination des murs de refends intérieurs, ouvrant une large marge à l'obtention de surfaces spacieuses et remodelables, il permet une homogénéité plus accentuée dans la répartition des flux relatifs à l'éclairage naturel ainsi que la ventilation à l'intérieur d'un complexe industriel. Effectivement, l'élimination des éléments faisant barrière à la libre circulation de l'air, ce dispositif procure à l'infrastructure une habileté accrue à favoriser la ventilation naturelle et le principe du rafraîchissement passif, aux dépens d'un système de ventilation intensif. Par ailleurs, le recours à l'éclairage artificiel devient amoindri grâce à la préconisation de la libre pénétration de la lumière naturelle, réduisant ainsi les consommations associées à l'électricité. De plus, et

surtout dans des contextes présentant des variations thermiques assez conséquente, le plan libre facilite l'atteinte de l'inertie thermique de ces édifices, leur offrant ainsi l'occasion de bénéficier d'une stabilité relative dans les températures intérieures. Ce dernier atout réduit considérablement la dépendance des différents espaces aux équipements de climatisation et de chauffage. En outre, en viabilisant la voie à une réorganisation spatiales adaptatives aux fluctuations des besoins, le plan libre permet, par parallélisme, une adaptation plus facile des flux d'air et de chaleur selon les saisons correspondantes, garantissant ainsi une meilleure performance énergétique. (ADEME, 2022)

La troisième solution résiliente est liée aux parois amovibles. Les parois démontables ont une importance primordiale dans l'amélioration des rendements énergétiques d'un ensemble industriel. Ces dernières offrent la possibilité de remodeler les espaces selon les exigences, optimisant ainsi l'efficacité thermique et acoustique des édifices. Durant la saison hivernale, ces cloisons peuvent servir à diviser des espaces et réduire les déperditions de chaleur en établissant des zones thermiquement isolées. Par contre, durant l'été, elles peuvent être réaménagées pour faciliter le passage de l'air et le refroidissement naturel des lieux de travail. Cette souplesse permet d'ajuster plus efficacement les besoins en énergie aux fluctuations climatiques et aux demandes particulières de chaque activité. En outre, les cloisons démontables améliorent l'isolation sonore des lieux de travail, diminuant ainsi le besoin d'avoir recours à des systèmes de climatisation bruyants ou à des équipements de ventilation mécanique excessivement puissants. En diminuant le bruit, elles contribuent aussi à l'amélioration du confort des employés, un élément crucial pour la productivité et le bien-être dans un ensemble industriel. (Wilo & Danfoss, 2025)

Le prochain dispositif concerne les espaces supplémentaires ou comme on les avait dénommés les espaces poly-vocationnels. L'intégration d'un espace additionnel dans une structure industrielle favorise une croissance contrôlée et l'optimisation des usages énergétiques. Au lieu d'une extension standard qui nécessite une consommation d'énergie constante, une pièce additionnelle peut être conçue pour opérer de façon autonome, avec des systèmes de chauffage, de ventilation et d'éclairage ajustés à son utilisation spécifique. Cette souplesse permet de prévenir le gaspillage énergétique en focalisant les ressources sur les espaces véritablement exploités. Par exemple, une salle de conférence, un espace de rangement ou un lieu de détente

peut être séparée thermiquement du reste de l'édifice et bénéficier d'un éclairage et d'une aération optimisés selon leur usage réel. En outre, l'ajout d'une extension peut être envisagé de façon bioclimatique, en tirant parti de l'orientation du bâtiment pour optimiser les gains solaires pendant l'hiver et restreindre la surchauffe durant l'été. En employant des isolants de haute qualité et en mettant en place des dispositifs de gestion efficace de l'énergie, on peut réduire au minimum l'empreinte énergétique de ces nouveaux espaces. (*Energy*, 2021)

Finalement, la dernière alternative évolutive traitée fut la hauteur accentuée des 'sous-plafonds'. L'emploi d'espaces à double hauteur dans un complexe industriel participe de façon notable à la gestion thermique et à l'optimisation du confort. La double hauteur facilite une meilleure régulation des transferts thermiques en favorisant le phénomène de stratification, en créant des volumes d'air plus importants. Puisque l'air chaud a tendance à s'élever, il peut être éliminé plus efficacement par des ouvertures placées en hauteur, réduisant ainsi la surchauffe durant les mois d'été. Ce concept est particulièrement avantageux pour les structures industrielles où des appareils de production produisent une importante quantité de chaleur. L'espace à double hauteur favorise la prévention de la surchauffe des zones de travail en facilitant le flux et l'élimination de l'air chaud. Durant la saison froide, une approche similaire peut être mise en œuvre en répartissant la chaleur emmagasinée vers les endroits à faible altitude où se trouvent les employés, diminuant de ce fait les exigences pour le chauffage. Par ailleurs, la hauteur sous plafond double permet une diffusion plus favorable de la lumière naturelle. En ajoutant des fenêtres panoramiques ou des lucarnes, on peut optimiser l'éclairage naturel à l'intérieur des espaces, diminuant de ce fait la consommation d'énergie due à l'éclairage artificiel. (*Energy & Buildings Journal*, 2021)

L'exposition du premier contingent de « solutions » achevée, on sursautera désormais sur la deuxième branche relative à l'intervention des outils technologiques et intelligents dans la procédure d'optimisation des performances énergétiques. En effet, en addition à l'architecture évolutive, l'innovation technologique est essentielle pour réduire la consommation d'énergie au sein des complexes industriels. L'emploi de technologies intelligentes et de solutions digitales permet une gestion plus précise et dynamique de l'énergie, ajustée en temps réel aux exigences du lieu. Dans le domaine des technologies, les systèmes de gestion technique du bâtiment (GTB), l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA) ainsi que les capteurs intelligents se

distinguent comme des instruments indispensables. La gestion technique de bâtiment offre une surveillance centralisée et automatique des dispositifs énergétiques (chauffage, ventilation, climatisation, éclairage), permettant ainsi d'optimiser leur performance. Associée à des détecteurs IoT, elle offre la possibilité de rassembler continuellement des informations sur la température, l'humidité, l'occupation ou même la qualité de l'air, dans le but d'ajuster dynamiquement les paramètres pour assurer le confort tout en restreignant l'utilisation d'énergie. Par exemple, la ventilation d'une salle de production peut être automatiquement diminuée en l'absence d'employés, ou son éclairage modifié en fonction de la luminosité naturelle. Cette gestion est dotée d'une dimension prédictive grâce à l'intelligence artificielle. En s'appuyant sur les données passées de consommation et les comportements d'utilisation, des algorithmes sont capables de prévoir les exigences énergétiques et d'organiser préalablement les cycles opérationnels des appareils, prévenant ainsi des pics de consommation superflus. Elle est aussi capable d'identifier des irrégularités ou des variations de performance, ce qui facilite l'entretien préventif et diminue les pertes d'énergie. L'innovation technologique englobe également les équipements en question. Les systèmes de chauffage et de climatisation modernes sont élaborés pour être plus performants, offrant des rendements supérieurs et une consommation réduite. Les systèmes de chauffage par pompe à chaleur industrielle, les installations hybrides (fonctionnant au gaz et à l'électricité), ainsi que les dispositifs de récupération de chaleur résiduelle (provenant des processus de production) offrent la possibilité d'exploiter l'énergie perdue et de la réintroduire dans le cycle énergétique du bâtiment. De plus, les installations industrielles de dernière génération intègrent fréquemment des dispositifs de production d'énergie verte, tels que les panneaux solaires, les systèmes thermiques solaires ou encore les petites éoliennes. Il est possible d'associer ces sources d'énergie locales à des dispositifs de stockage (batteries au lithium-ion, hydrogène) afin d'atténuer les surcharges de consommation et diminuer la dépendance vis-à-vis du réseau électrique. Des micro-réseaux énergétiques (microgrids) sont aussi adoptés par certains secteurs, ce qui permet de contrôler localement la production, l'accumulation et l'utilisation de l'énergie en fonction des exigences. Finalement, la technologie propose également des instruments d'analyse à l'échelle macro grâce à des jumeaux numériques du bâtiment. Ces modèles numériques offrent la possibilité de reproduire en direct les conditions d'opération du complexe industriel, d'expérimenter diverses approches énergétiques et de déterminer les points d'optimisation avant leur application réelle. Ces instruments permettent aux

responsables de peaufiner leurs choix et d'optimiser l'efficacité énergétique de leurs équipements. (*Energy & Buildings Journal*, 2021)

Dès lors, en intégrant des dispositifs à l'image des parois amovibles et rétractables, les surfaces supplémentaires et la double hauteur incorporés dans un plan libre et modulable, l'architecture résiliente constitue une réponse assez efficiente aux défis et enjeux énergétiques que confrontent les complexes industriels de production. Son rayon d'action peut s'étaler jusqu'à impacter toutes les installations techniques pouvant intervenir dans une infrastructure à caractère industriel, tels que le chauffage, la climatisation et l'éclairage. Ces stratagèmes permettent à la fois d'assurer le confort de tous les intervenants dans la gestion du complexe ainsi que de générer une ossature résiliente et flexible qui confrontera sereinement les potentielles évolutions dans les activités industrielles. En réconciliant ces principes à des solutions bioclimatiques et à des technologies intelligentes de gestion de l'énergie, les infrastructures industrielles auront la possibilité de franchir un cap énorme et d'atteindre des seuils de performance énergétique élevés, tout en veillant à minimiser leur empreinte environnementale.

6.Conclusion :

Dans ce chapitre, que nous sommes entrains de conclure, on a minutieusement évoqué toutes les notions relatives aux complexes de production industriels, qu'ils soient conventionnels ou intelligents, ainsi que les enjeux et les défis auxquels sont-ils confrontés. Nous avons également énuméré et détaillés les deux grandes branches de solutions que nous avons proposés, ainsi que leurs potentielles interventions dans le secteur industriel pour optimiser les consommations énergétiques qui lui sont inhérentes. Désormais, avant de passer à la partie analytique de cette recherche, il convient de dresser quelques synthèses des éléments abordés et de tirer quelques enseignements.

Au premier lieu, en observant de près les deux branches de solutions auxquelles on s'est penché, on constate une compatibilité parfaite entre les attributs de chacune envers l'autre. En effet, d'un côté on retrouve le concept relatif à la philanthropie qui, appliqué en architecture, vise à assurer des constructions davantage durables, écoresponsables et flexibles face aux probables fluctuations futures. De l'autre côté, on retrouve le secteur technologique, qui en exploitant ses avancées dans le domaine de la construction, on parvient à ériger des édifices énergétiquement

autonomes et hyper flexibles. L'intersection de leurs attributs, dès lors, nous offre le produit tant espéré qui permettra de contribuer à l'optimisation des consommations énergétiques au sein des complexes de production industriel. En effet, l'association d'une architecture philanthropiquement penchée, à travers le recours à des principes de la construction résiliente et à l'utilisation de matériaux verts, à des systèmes intelligents intégrés dans l'ossature même de l'édifice, permettant un contrôle entier de toutes ses prestations, permet l'obtention d'un prototype industriel écoresponsable, durable, évolutif et à métabolisme énergétique intelligent.

Le chapitre suivant est consacré à un travail analytique acharné, à l'issue duquel on consolidera les enseignements tirés dans tout ce qui précède, afin de parvenir à concevoir le prototype industriel escompté.

Chapitre III :

Corpus d'étude

1. Introduction :

Le corpus d'étude qu'on va entamer dans cette partie de la recherche adopte une démarche méthodologique rigoureuse. Au premier lieu, celle-ci est articulée autour de trois segments fondamentaux ; à savoir la grille d'analyse de cas concrets, l'analyse du cas d'étude et enfin la simulation informatique. Il sera donc abordé par une présentation exhaustive de modèles concrets de complexes productifs intelligents ainsi que de complexe de production spécialisés en textile, et ceci afin de se procurer d'une vision plus claire sur les différentes manifestations des infrastructures industrielles. Ensuite, on entreprendra l'exposition d'un cas d'étude spécifique dans le contexte local, en l'occurrence le complexe agroalimentaire de Cevital situé dans la ville de Bejaia. Une observation in-situ ainsi qu'une série d'entretiens, effectués avec quelques cadres participants dans activement dans la gestion globale du complexe, nous apporterons l'aide nécessaire pour effectuer une analyse qui s'avèrera bénéfique pour le reste du travail. Cette partie sera clôturée, après avoir choisi le logiciel adéquat, pris les mesures nécessaires ainsi qu'une modélisation architecturale, par une simulation informatique sur le cas d'étude. L'ensemble de ce travail nous servira à atteindre notre objectif final qui consiste en parvenir à concevoir un projet apportant les solutions architecturales, technologiques et énergétiques aux problématiques de consommation énergétiques au sein des complexes de production industriels.

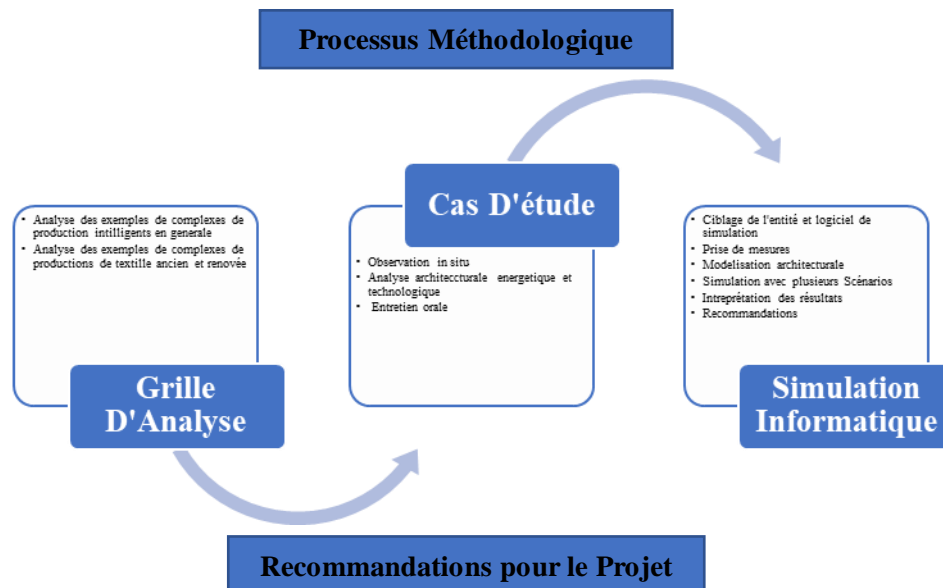


Figure 12 : schéma explicatif du déroulement du chapitre , *source : traitement personnel*

1.1. Grille d'Analyse :

Lors de notre démarche nous avons effectué une multitude d'analyses architecturales, énergétiques et technologiques de plusieurs modèles exogènes concrets. Celles -ci visent principalement à se familiariser avec les divers besoins spatiaux de ces complexes industriels, ainsi que leurs modes d'actions dans l'optique de gestion et d'optimisation intelligentes de leurs consommations énergétiques.

1.2. Observation (In-Situ) :

L'observation in situ implique de visiter et de cerner l'allure globale de l'infrastructure à analyser en exploitant l'outil de photographie, qui atteste de l'état des lieux, sur les éléments qui sont étroitement lié à notre analyse : Systèmes de HVAC, Orientations spatiale, ouvertures, Matériaux, texture Végétations, signalisation ...etc. l'observation est un outil souvent recommandé, car elle aide à effectuer une analyse qualitative plus efficace et prolifique.

1.3. Entretiens oraux :

Au cours du stage effectué au sein de l'établissement qui constitue notre cas d'étude, nous avons mené une série d'entretiens oraux auprès de quelques acteurs actifs intervenant dans la gestion quotidienne de l'infrastructure. L'entretien s'est focalisé autour de la question de la qualité spatiale et sa réponse aux besoins de confort des utilisateurs, ainsi que des questions concernant les systèmes de production, la gestion et les modes d'optimisation énergétique furent soulevés afin de s'octroyer des réponses pertinentes répondant à notre problématique.

1.4. Simulation numérique :

Afin d'effectuer la simulation escomptée, le logiciel choisi est « ArchiWizard ». Il s'agit d'un logiciel de simulation énergétique, développé par la société Française « Graitec ». ArchiWizard permet d'effectuer des études qui se relatent au confort thermique ainsi qu'à l'éclairage naturel ce qui offre l'opportunité de visualiser les performances énergétiques d'un projet avant même sa réalisation. Ce logiciel offre, en outre, un grand nombre d'avantage. En effet, il se caractérise par une interface graphique intuitive adaptée aux architectes et aux ingénieurs, tout en offrant des modélisations visuelles et rigoureuses d'édifices de composition complexe à l'image des complexes industriels ; ainsi qu'une compatibilité avec un nombre

important de logiciels de modélisation architecturale. La possibilité de simuler en temps réel des performances énergétiques, après avoir incorporer le modèle de maquette 3D, octroie donc l'opportunité d'optimiser et de concevoir un projet bioclimatique sans courir des risques de modification après construction. (*ArchiWizard, 2025*)

2. Analyse de cas concrets :

À l'issue du cadre théorique précédent qui, à travers l'exposition chronologique de l'évolution architecturale des infrastructures industrielles ainsi que de l'incorporation progressive des technologies durables dans ceux-ci, visait à cristalliser les bases conceptuelles et techniques, associées à l'optimisation des performances énergétiques au sein des complexes industriels intelligents de production, nous allons désormais aborder le contingent pénultième de cette recherche, adoptant une approche analytique appliquée. Dans l'optique de mettre en exergue les choix de conception, les modalités d'intégration des systèmes de gestion énergétique en plus de l'impact de l'intelligence artificielle, des matériaux de construction, de l'organisation spatiale et des outils numériques sur les consommations énergétiques, on fera confronter, sous des points de vue architectural et technologique, les éléments précédemment élaborés à des archétypes concrets de complexes industriels intelligents. Cette partie servira à ériger un socle critique pertinent qui nous rendra plus aisée, dans la phase ultime de la recherche, la formulation des recommandations en faveur d'une architecture plus philanthropiques et adaptée aux enjeux contemporains dans les infrastructures industrielles.

À défaut de la disponibilité d'une documentation graphique à exubérance, et afin de parvenir pleinement aux objectifs de cette partie cruciale, on s'est consenti à multiplier le nombre des modèles de complexes industriels intelligents à présenter. Chacun des modèles exposés dans ce qui suit, manifeste des notions et des éléments qui le distinguent et sur lesquels se focalisera notre analyse. Ils constituent un échantillon de projets considérés comme les précurseurs d'un nouveau type de penser de la conception des infrastructures industrielles, à travers des environnements prenant davantage en considération d'assurer toutes les commodités nécessaires à toute catégorie de leurs utilisateurs.

2.1. La Smart Factory de Future Stitch:

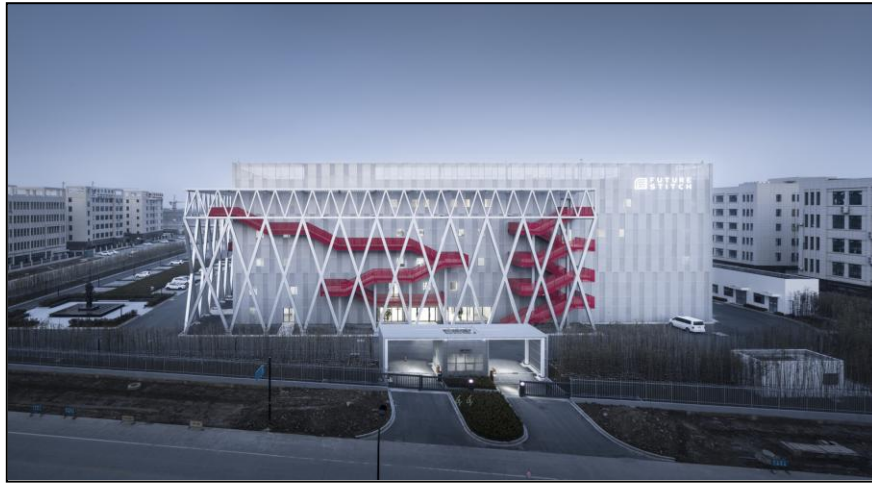


Figure 13 : Illustration de la smart factory de Future Stitch ,source : *archello.com*

2.1.1. Présentation générale :

La Future Stitch est le premier exemple de smart factory qu'on va aborder. Occupant une surface d'environ 26800m², elle est inaugurée, par le groupe d'architectes "AZL architects", en octobre 2008 dans la zone du développement de Haining à la province de Zhejiang en Chine. Elle constitue la plateforme de production de la marque américaine STANCE se spécialisant dans la fabrication des chaussettes et des articles de sports. (Shuangyu, 2025)

Ce bâtiment industriel se démarque par un système architectural singulier faisant diluer, d'une manière innovante, la dimension industrielle dans un mélange ingénieux d'art, d'écologie et d'innovation technologique. (Shuangyu, 2025)

Dans cette usine, le principe de répartition spatiale suit une logique de fonctionnalité. En effet, le projet peut être décomposé en contingents possédant, pour chacun, une vocation précise. On peut clairement sobrement distinguer une zone de production, une zone administrative et une zone communautaire. Les divers circuits de l'équipement sont conçus d'une manière à rendre plus fluide et aisée la connectivité entre ses différentes parties. Une jonction spatiale sans rupture, associée à une incorporation de la dimension paysagère et artistique, qui plaident pour un bien être des usagers, offrent, par conséquent, une continuité fonctionnelle extrêmement maîtrisée. (Shuangyu, 2025)

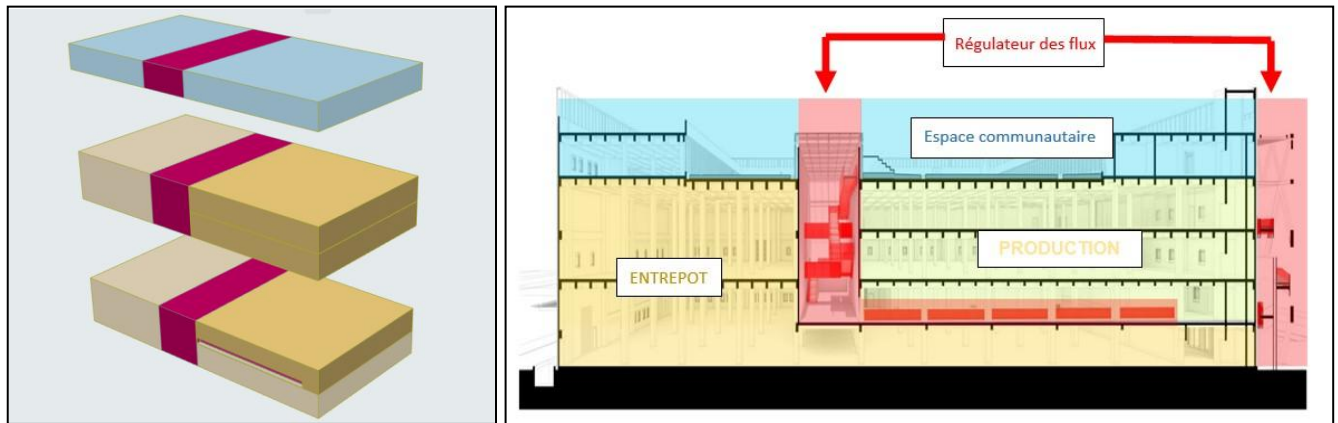


Figure 14 et 15 : Schémas montrant le zonage fonctionnel de l'équipement, *source :*

Traitement personnel via le logiciel ArchiCad

La conception du complexe fut effectuée dans une optique de modularité et de flexibilité. La réponse aux évolutions en dents de scie de la production industrielle contemporaine qu'elles soient l'exigence d'une reconfiguration spatiale, la nécessité d'intégration des nouvelles progrès techniques et technologiques, les besoins inhérents au processus de fabrication ou bien même de la nature des produits, est préconisée dès la phase conceptuelle de cette usine. Comme effet, cela engendrait non seulement une optimisation logistique mais également une réduction massive des éventuels couts des potentielles mutations fixtures qui peuvent se produire au sein de l'équipement ; ceci tout en préservant un niveau haut de performance opérationnelle. (Shuangyu, 2025)

La smart factory Future Stitch se distingue en outre par la valorisation de la dimension culturelle. Le groupe AZL architects s'est inspiré des grottes de Maiji Shan en Chine dans la logique des systèmes de circulation, alliant ainsi, dans la même logique adoptée au centre Pampidou à Paris, entre tradition locale et modernité. Ce design perspicace se démarque par une fluidité de circulation faisant une ségrégation claire des différents parcours à entreprendre par chaque catégorie des usagers de cet équipement. Trois circuits principaux se distinguent ; un circuit principal reliant entre les différentes entités du projet, un circuit secondaire garantissant la fluidité de la chaîne de production (de la matière première jusqu'à l'expédition), ainsi qu'un circuit tertiaire canalisant vers les zones artistiques et espaces d'exposition sans chevauchement avec la chaîne de production. (Shuangyu, 2025)

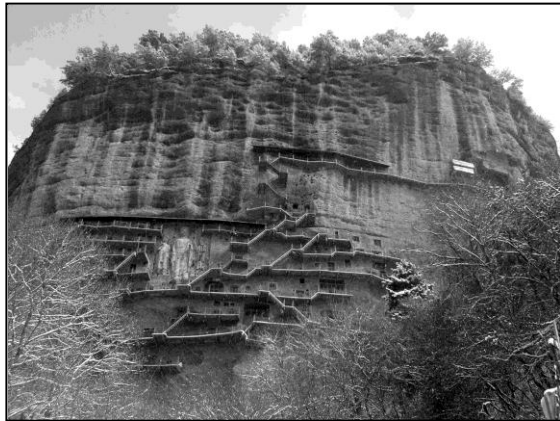


Figure 16 : les grottes de Maiji Shan en Chine,
source : nationalgeographic.fr



**Figure 17 : Les escaliers extérieurs du Future
 Stitch, *source : archdaily.com***

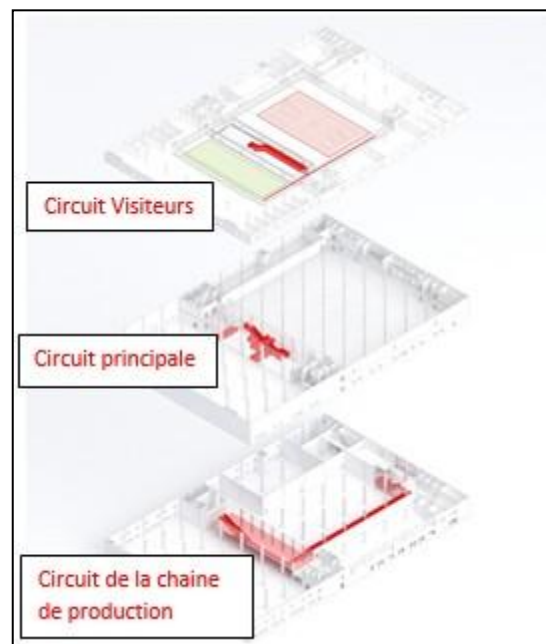


Figure 18 : Schéma des circuits régissant l'équipement de Future Stitch,
source : archdaily.com & traitement personnel

Par ailleurs, la stitch future constitue un modèle de par l'assurance du volet sécuritaire. En effet, des escaliers extérieurs ainsi que de larges corridors font office de systèmes d'évacuation. Ces derniers assurent pleinement leur rôle dans l'optique de modularité et flexibilité visée par le groupe d'architectes. (Shuangyu, 2025)

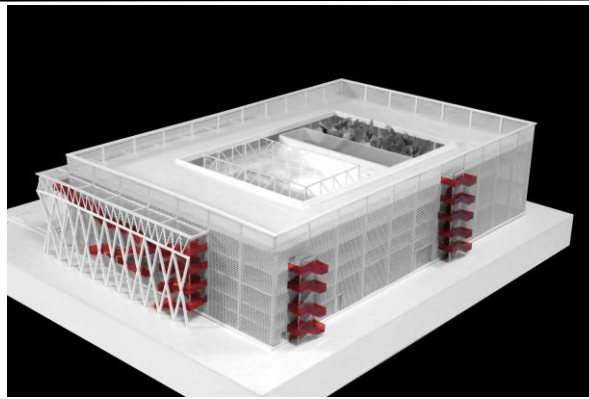


Figure 19 : Schéma des systèmes d'évacuation de l'équipement, source : *archdaily.com*

En guise de structure, le complexe adopte une ossature métallique légère. Le choix s'est porté sur ce type de structure à cause des avantages qu'ils présentent permettant de répondre à des exigences relatives aux notions d'évolutivité et de modularité. Les structures métalliques légères offrent l'occasion de se doter d'une grande souplesse dans l'aménagement intérieur en favorisant de larges portées libres. En outre, elles servent à supporter de larges charges intrinsèques aux machines tout en permettant l'intégration aisée des systèmes de domotique avancée. Enfin, elle permet à l'équipement de s'adapter aux potentielles évolutions industrielles et numériques. (Shuangyu, 2025)

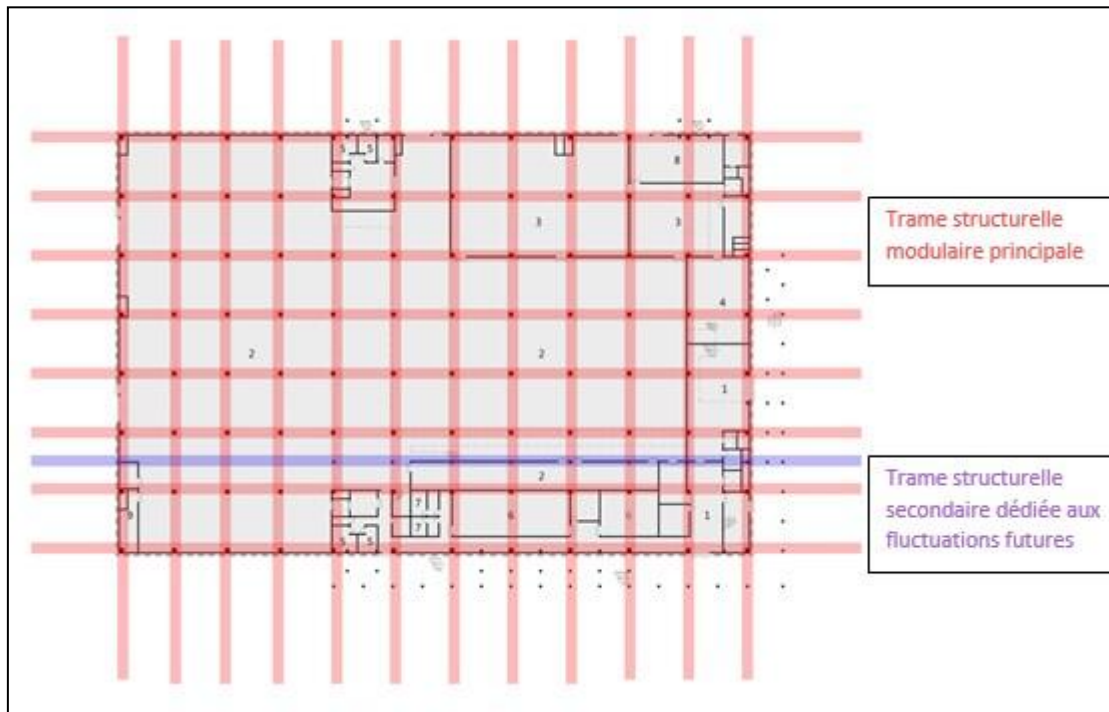


Figure 20 : Schéma structurel modulaire de l'équipement de Future Stitch, source : *archdaily.com* & *traitement personnel*

Chacune des façades composant l'équipement est marquée par la répétition d'un seul module d'ouvertures s'insérant ainsi dans la démarche évolutive globale de l'usine. Les façades Nord et Ouest, se caractérisent par un degré d'opacité plus conséquent, incorporant des circuits d'évacuation. Par contre, les façades Sud et Est sont conçues en favorisant leur perméabilité face à l'éclairage naturel. (Shuangyu, 2025)

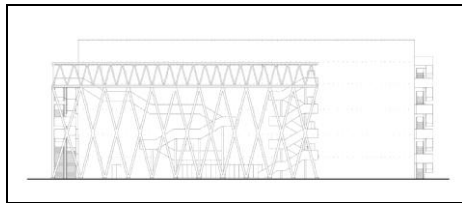


Figure 21 : Façade nord de l'équipement, source : *archdaily.com*

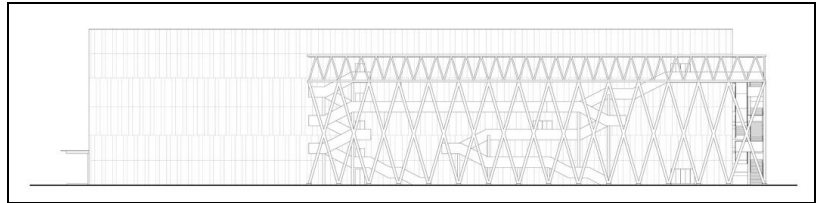


Figure 22 : Façade Ouest de l'équipement, source : *archdaily.com*

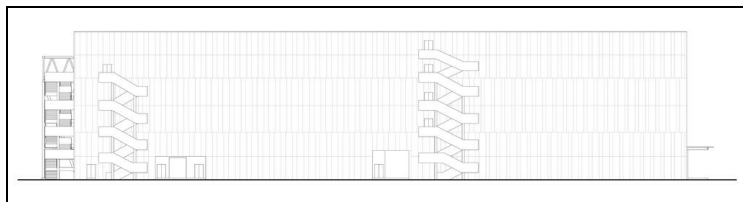


Figure 23 : Façade Est de l'équipement, source : *archdaily.com*

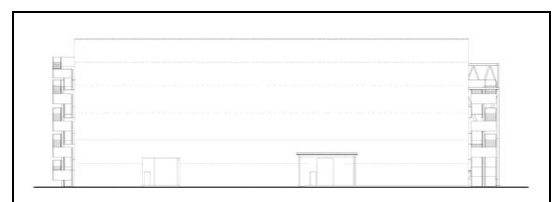


Figure 24 : Façade Sud de l'équipement, source : *archdaily.com*

L'approche énergétique du future stitch est fondée sur une combinaison de deux leviers. D'un côté un système passif de l'autre un système actif, les deux visant à optimiser les performances énergétiques et à créer un environnement ambiant et commode. (Archdaily, 2025)

Le mode de gestion passif est mis en évidence à travers une orientation des façades qui permet à l'équipement de bénéficier de l'éclairage naturel à l'aide de grandes et larges ouvertures. Par ailleurs les espaces communautaires tels que les aires de détente se voient octroyés d'importantes surfaces végétalisées qui génèrent un environnement doux favorisant la climatisation et aération naturelles. Tandis que le second système de gestion énergétique est le système passif Celui-ci subordonné à un système de gestion intelligente de l'énergie BMS, facilitant le pilotage régularisé et optimal des consommations au sein de l'édifice. (Shuangyu, 2025)

2.2. Trumpf Hungary Smart Factory / Barkow Leibinger:



Figure 25 : Illustration de la Trumpf Hungary, smart factory,
source : c3globe.com

2.2.1. Présentation générale :

L'usine est conçue par le cabinet d'architecture Barko Leibinger, elle est inaugurée en 2023 à la ville de Godollo à la capitale Hongroise de Budapest s'étalant sur une superficie de 5300 m². L'équipement se spécialisant dans la production des machines, outils et systèmes laser, représente un exemple emblématique de la convergence entre innovation architecturale, énergétique et technologique, en intégrant des systèmes intelligents dans la gestion globale du projet tout en valorisant son architecture dotée d'une dimension hautement artistique en veillant à ne guère négliger la vocation mère de l'usine, en l'occurrence la production industrielle, constituant une vitrine de promotion pour l'industrie 4.0. (Koshta, 2025)

Le plan est fondé sur une continuité et évolutivité de production face aux fluctuations future spatiale et technologique grâce aux configurations en plateaux ouverts modulables adaptables et le flux linéaire de production approvisionnement, production et expédition. (Koshta, 2025)

S'adaptant à la forme de la parcelle acquise, l'organisation spatiale est basée sur un plan en trapèze exploité stratégiquement par B. Leibinger. Il aménagea une salle d'exposition à double hauteur orientée vers le sud qu'il laissa la façade comme entrebâillante pour qu'elle soit visible à partir de son environnement immédiat. Le côté Nord abrite un volume à deux niveaux, l'un est

composé d'une zone de production étalée au RDC l'autre est composée de bureaux, une salle de réunion, espace pédagogique et zone de stockage aménagés au niveau de l'étage. Cette organisation offre aux visiteurs ainsi qu'aux utilisateurs habitués de l'équipement une vue architecturalement pittoresque en circulant sur la mezzanine générée en ayant la possibilité d'entrevoir les procédés de fabrication en contrebas. (Koshta, 2025)

L'usine est structurée en nappes fonctionnelles limpides, avec une disposition longitudinale et liant les espaces d'approvisionnement et d'expédition périphériques à travers les ateliers de production centraux. (Koshta, 2025)

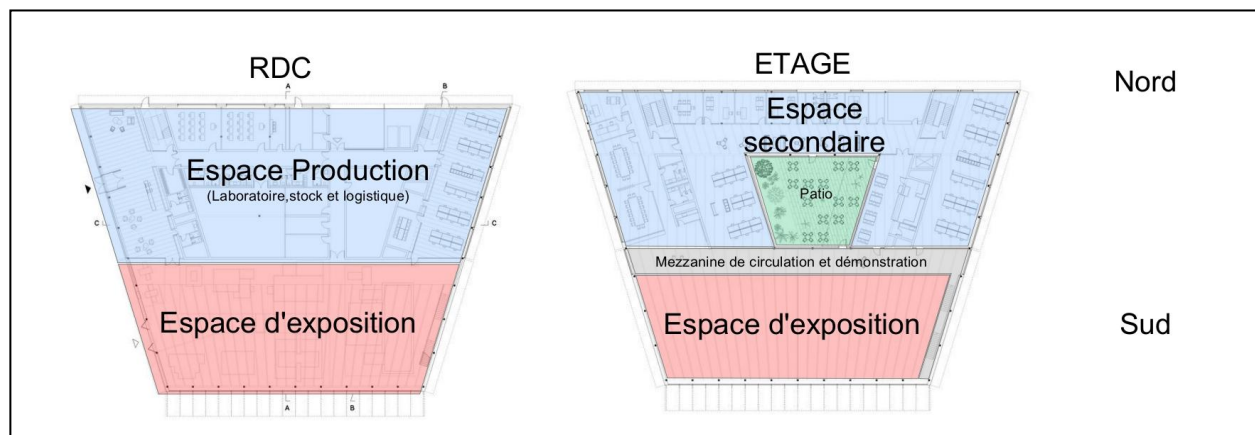


Figure 26 : Zonage fonctionnel de la Trumpf Hungary smart factory source : *archdaily.com*

L'organisation linéaire des fonctions favorise une fluidité de circulation interne sans aucun risque d'entremêlement entre les différentes entités de l'usine. Le système de linéarité est, par ailleurs, exploité afin de rendre le système de production et de logistique plus efficient en alignant les trois principales branches de la chaîne de production (approvisionnement, production puis expédition). L'équipement est doté de larges passerelles et d'une vision claire sur l'ensemble du processus de production facilitant la supervision aux supérieurs hiérarchiques et offrant une occasion de le découvrir aux visiteurs. (Koshta, 2025)

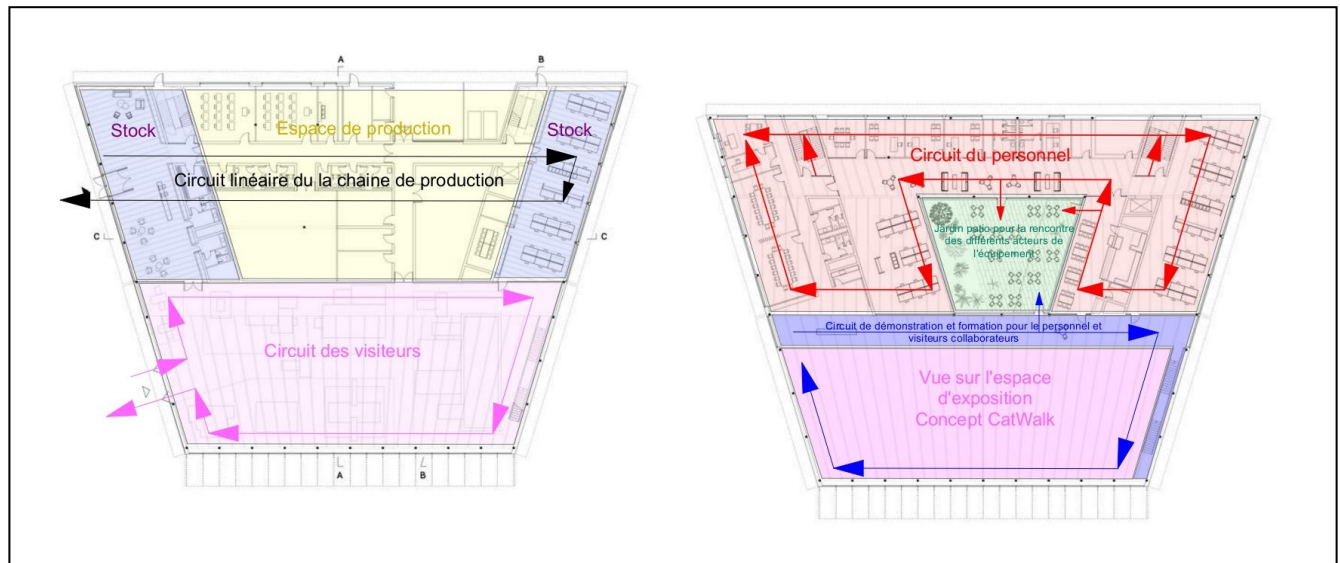


Figure 27 : plan des circuits du RDC et des étages de la Trumpf Hungary smart factory, *source : archdaily.com & traitement personnel*

L'architecte avait fait recours à une structure à grande portée en acier. La structure à grande portée en acier. Associée au revêtement tantôt en acier, tantôt en panneaux métalliques, propre aux murs porteurs extérieurs, elle crée un espace libre conséquent, et de générer une mezzanine qui sert à une double finalité, à savoir l'exposition et l'esthétique du lieu. Une toiture en bois lamellé collé incliné dans la direction de la cour avec des inclinaisons à l'extrémité procurent au volume une dynamique architecturale tournée vers l'intérieur, une forme de boîte ouvrante faisant allusion à la vocation de l'infrastructure, ainsi qu'elles jouent le rôle de pare-soleil aux façades vitrées. (Koshta, 2025)



Figures 28 et 29 : Vues rapprochées sur le revêtement composite des façades et sur la toiture de la smart factory de Trumpf Hungary, *source : archello.com*

L'ossature s'étaye sur des poutres apparentes organisée en trois bandes disjointes disposées suivant l'axe Nord-Sud. Cette disposition en bandes, mettant en avant la texture du plafond, donne une sensation de profondeur à celui-ci permettant ainsi d'intégrer les accessoires d'éclairage, des surfaces acoustiques ainsi que du pontage en bois assurant des fonctions esthétiques. (Koshta, 2025)

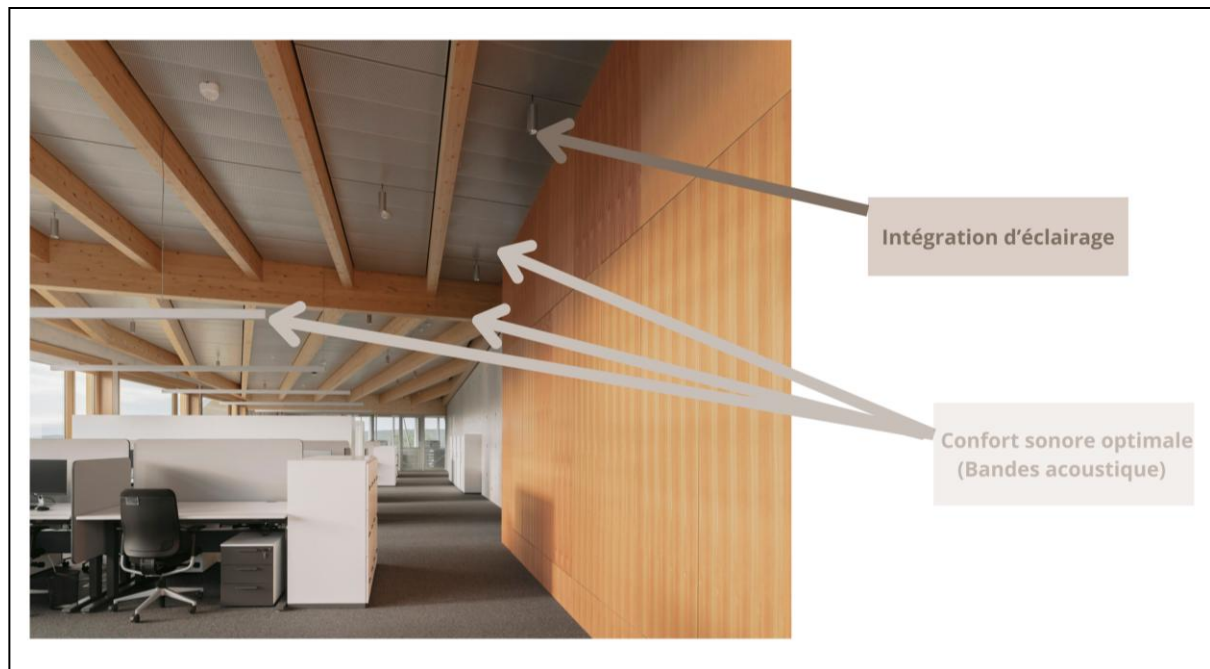


Figure 30 : Illustration montrant la disposition intérieure de l'ossature, source : *archdaily.com* & traitement personnel

La conception de la « Trumpf Hungary smart factory » s'est fondée sur une approche bioclimatique visant à assurer une consommation énergétique optimale. Son implantation ainsi que son orientation sont choisies dans le but de maximiser les apports passifs solaires tout en veillant à minimiser les déperditions thermiques en incluant des espaces végétaux maîtrisés, qui consolident le confort thermique extérieur et facilitent la régulation thermique naturelle du micro-climat. En outre, l'association de vitrages à haut rendement énergétique, utilisés pour leurs qualités d'isolation, ainsi que les pare-soleils, dont a fait la description précédemment, crée un équilibre optimal entre éclairage naturel, confort intérieur et efficacité énergétique. Par ailleurs, l'usine exploite un système de gestion intelligent reposant sur les capteurs IoT, ainsi qu'un système BMS, qui permettent de contrôler et d'ajuster automatiquement les paramètres

environnementaux internes tels que la température, l'éclairage et l'humidité en fonction des conditions réelles d'usage, ce qui procure à l'équipement une possibilité de réduction des coûts énergétiques tout en assurant le confort des usagers et la pérennité des machines. (Koshta, 2025)

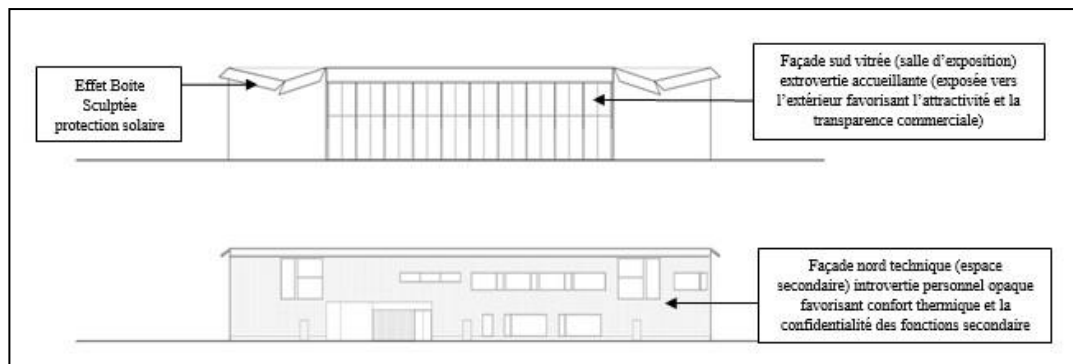


Figure 31 : Illustration démontrant le principe d'exposition des façades, source : archdaily.com & traitement personnel

2.3. TRUMPF Smart Factory Chicago :



Figure 32 : Illustration de la façade de la smart factory de Trumpf à Chicago, source : archdaily.com

2.3.1 Présentation générale :

La smart factory de Hoffman Estates est conçue par le cabinet d'architecture Barkow Leibinger en 2017. Elle représente un modèle type des futures usines intelligentes incorporant les notions de l'industrie 4.0 dans un modèle architectural de hautes qualités artistique, technologique et écologique. (*ArchDaily*, 2025)

L'usine se spécialise dans le domaine des machines-outils et des technologies laser. Trumpf a imaginé ce site comme un démonstrateur de grandeur afin d'attirer des clients et des partenaires technologiques dans un environnement clair, ouvert et évolutif. La factory se situe à proximité de l'interstate 90 et de l'aéroport international O'hare, qui est un contexte semi naturel présentant un bassin de rétention et des pelouses humides, ce qui facilite l'affirmation des principes escomptés lors de la conception, à savoir perméabilité et repérage, tout en offrant un environnement industriel doux et agréable. (*ArchDaily*, 2025)

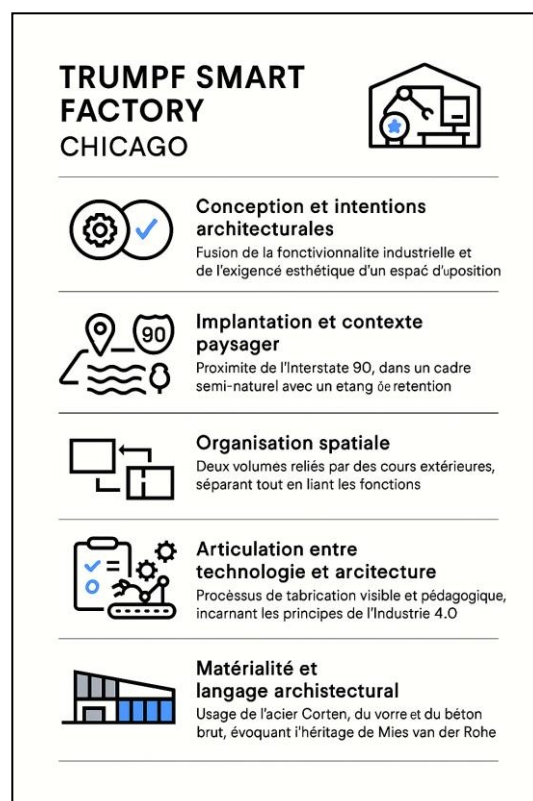
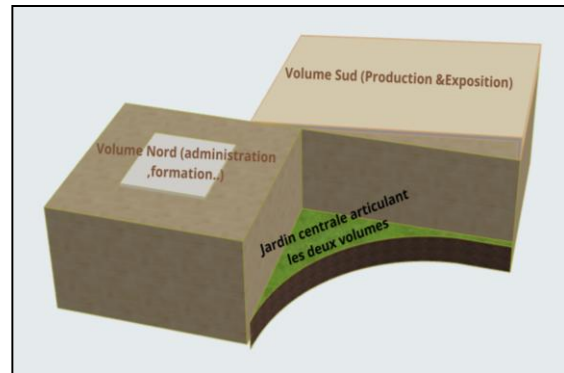
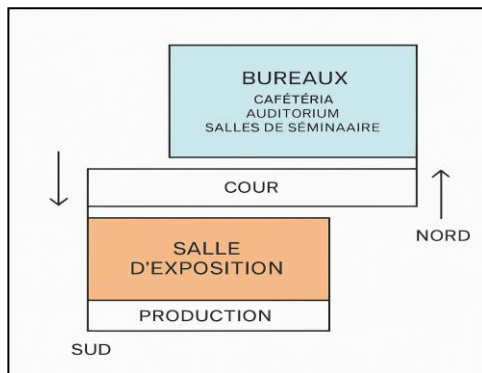


Figure 33 : schéma illustrant les principes préconisés par la smart factory de Trumpf à Chicago,

source : Générée par l'IA

Le volume de l'équipement est susceptible d'être démantelé en deux blocs distincts. La partie Sud accueille une vaste aire d'exposition (showroom) organisée en double hauteur sur laquelle est installée la machinerie Trumpf en démonstration. Ceci donne au lieu de production un fonctionnement hybride entre lieu de production, d'exposition de communication et de commercialisation ; étant donné qu'il assure le principe de Catwalk. Tandis que la partie opposée, celle qui est située au côté Nord, détient les fonctions tertiaires, des bureaux, les espaces dédiés à la formation, un auditorium et une cafeteria, faisant de celui-ci une zone propice au travail quotidien et à la collaboration. La jonction entre les deux volumes principaux s'effectue par le biais de cours extérieures et de patios assurant la fonction de ponts de rencontre et d'échanges informels entre les employés, les visiteurs et les collaborateurs. (ArchDaily, 2025)



Figures 34 et 35 : illustrations du principe de zonage fonctionnel dans la smart factory de Trumpf à Chicago, source : Traitement personnel par le logiciel ArchiCad



Figures 36 et 37 : illustrations montrant les aires de circulation assurant la liaison entre les deux volumes de la smart factory de Trumpf à Chicago, source : ArchDaily.com

L'usine est organisée suivant un plan ouvert offrant une circulation longitudinale fluide pour les visiteurs et les employés. La passerelle surélevée au centre, tel on l'avait abordé dans la page précédente) sert à la fois comme élément créant une vue panoramique sur le processus industriel, de laquelle le passager pourra assimiler les démarches et les méthodes de fabrication, ainsi qu'à garantir la jonction entre les deux entités fondamentales du projet. D'une autre part, le système de circulation au sein de l'équipement est pensé d'une manière à assurer une certaine ségrégation entre les divers parcours inhérents aux différents types d'usagers. En effet, les entités qui sont censées recevoir du public telles que la salle d'exposition et les cours extérieures sont aisément accessible, tandis que les parties privées sont, paradoxalement, dotées de points d'accès entravés et strictes. Cette stratégie assure la perméabilité, la sûreté et la lisibilité des circuits dans un milieu industriel pédagogique. (*ArchDaily*, 2025)

La manufacture dispose d'un système structurel métallique à base d'acier découpé au laser. Onze (11) poutres principales s'étendent sur une portée de 45 m couvrant le hall d'exposition en double hauteur, visibles et mises en valeur dans le showroom afin de démontrer le degré de technicité avancée qui est adopté au sein de l'usine ainsi que l'esthétique contemporaine des matériaux industriels soignée et maîtrisés par « Trumpf ». Par ailleurs, l'équipement est doté d'une ossature en acier « Corten » embellissant ses façades avec sa texture brute et élégante, offrant au volume une allure industrielle moderne. (*ArchDaily*, 2025)

Relativement au volet énergétique, « Trumpf Hungary smart factory » dispose d'un système énergétique performant et optimal, grâce notamment à sa conception judicieuse et ses équipements efficaces. Au premier abord, elle présente une conception passive efficiente, grâce à une orientation concertée des façades permettant de maximiser les apports solaires porteurs de lumière naturelle, ainsi qu'à travers ses patios et cours végétalisées acquérant non seulement une climatisation naturelle mais également un environnement interne frais. De plus, l'usine utilise des matériaux isolant à haut rendement assurant une enveloppe thermique renforcée et efficace. Par addition, des équipements performants de conception (CVC) et des systèmes d'automatisation de machinerie, activés via des capteurs IOT ainsi qu'un système de gestion centralisé, contrôlant et ajustant la consommation d'énergie dans les différentes entités du projet sans aucune perte, renforcent les rendements économiques de l'équipement tout en prenant en considération la préservation de l'environnement. (*ArchDaily*, 2025)

Après avoir achevé la première partie de cette analyse, on va désormais consacrer la seconde moitié pour une présentation plus mitigée des exemples. Quoique possèdent-ils une documentation et base de données assez infime, ils s'illustrent, pour chacun d'eux, à travers des atouts qui les rendent parmi les archétypes les plus représentatifs de l'industrie 4.0. Les modèles qu'on exposera sont les suivants : la smart factory de Schneider Electric à Lexington (Kentucky), Siemens Electronics Works à Amberg (Allemagne) et Bosch à Stuttgart-Feuerbach (Allemagne)

2.4. Schneider Electric smart factory :

Schneider Electric smart factory entamera cette moitié de l'analyse. Livrée en 1958, elle a été modernisée par Schneider Electric pour ensuite constituer une emblématique manufacture intelligente ; un fait asserté par la reconnaissance du Forum économique mondiale qui lui décernait le prix de « Advanced Lighthouse » qui reconnaît les sites industriels ayant adopté les technologies de la quatrième révolution industrielle.



Figure 38 : illustration de l'enveloppe extérieure de Schneider Electric smart factory,

source : lefigaro.fr

La mission de modernisation qu'avait entrepris Schneider Electric au sein de cette infrastructure se divisait en deux principaux segments. L'un est relatif à l'architecture, tandis que l'autre est d'ordre technologique. D'une part, l'entreprise avait procédé à une reconfiguration, réutilisation et renforcement spatiale et formelle toute en favorisant une fluidité dans les parcours de circulation, fabrication, logistique et maintenance ; ainsi qu'au rajout de matériaux isolants, ce qui permet d'assurer l'adaptabilité de l'équipement face aux altérations futures dans les systèmes

technologiques tout en optimisant les dépenses énergétiques et en minimisant son impact écologique. D'une autre part, elle avait entrepris un procédé de transition du Brownfield au Greenfield, en centralisant les données des équipements usines machines, capteurs et systèmes de gestion à la plateforme fournie par Schneider Electric appelé « EcoStruxure ». Celle-ci permet une surveillance en temps réel, un pilotage énergétique intelligent et une maintenance prédictive grâce à l'incorporation de la réalité augmentée (formation des opérateurs et maintenance suivant les données de l'infrastructure), l'analyse prédictive (des données issues par les capteurs exploitée pour détecter et anticiper les défaillances)et le recours aux capteurs IOT(déployés sur l'ensemble du système : consommation énergétique, performances de machines et conditions environnementales internes permettant un suivi permanent), qui par conséquent, réduit palpablement les couts et les dépenses générales relatives aux consommations énergétiques, rend infime son empreinte écologique et procure une réactivité et résilience accrues. (*Schneider Electric, 2025*)

Partie	Détails
1. Contexte	Brownfield → Greenfield : Transformation d'une zone industrielle existante en un espace moderne et optimisé.
	Besoin : Connectivité, centralisation des données, automatisation intelligente.
2. Écosystème Technologique	IoT Sensors (Capteurs IoT) : Suivi de la consommation énergétique, surveillance des équipements, conditions environnementales (température, humidité).
	Predictive Analytics (Analyse prédictive) : Collecte et traitement des données, détection précoce des défaillances, anticipation des besoins de maintenance.
	Augmented Reality (Réalité augmentée) : Formation interactive des opérateurs, support maintenance en temps réel, visualisation des données invisibles sur site.
3. Plateforme Centrale	EcoStruxure Platform : Réunit l'IoT, l'IA et la réalité augmentée, assurant un monitoring en temps réel et permettant une réaction automatisée aux événements.
4. Résultats	Efficacité énergétique maximisée, Maintenance prédictive efficace, Réduction des coûts, Bien-être des opérateurs (moins d'interventions manuelles).

Tableau 02 : Fonctionnement digitale de Schneider Electric smart factory, *source : Traitement personnel*

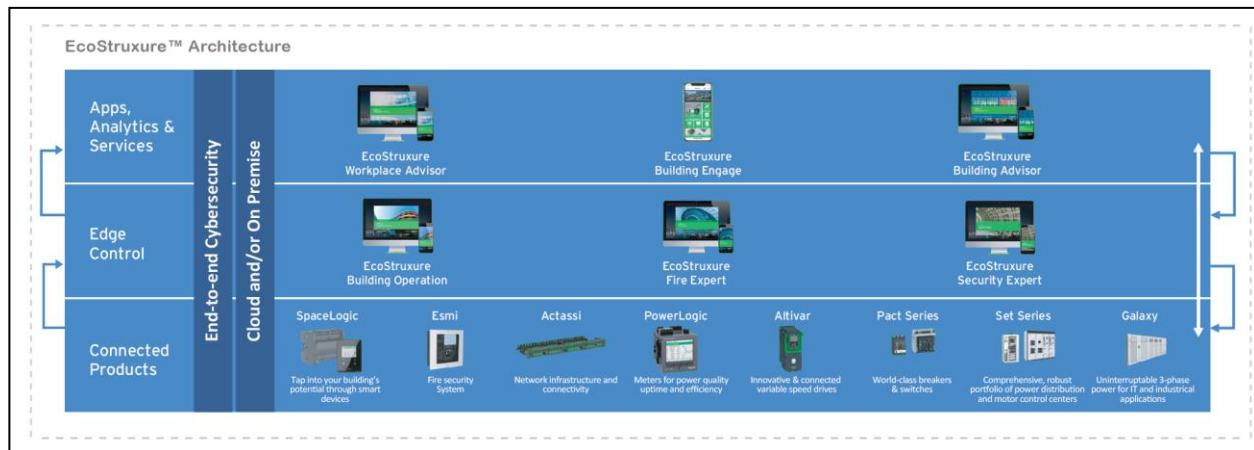


Figure 39 : Schéma décrivant le fonctionnement de la plateforme Ecostruxure, responsable de la gestion énergétique au sein de Schneider Electric smart factory, *source : cm3inc.com*

2.5. Siemens Electronics Works :

Le second exemple s'agit de l'usine Siemens située à la ville d'Amberg au sud d'Allemagne. Cette infrastructure est souvent considérée comme étant l'un des pionniers importants de l'industrie 4.0. En comptant plus 75% d'automatisation et adaptation numérique complète dans sa chaîne de production, elle constitue un modèle type de la digitalisation manufacturière réussie. (*Siemens Electronic Works, 2025*)



Figure 40 : Image montrant l'enveloppe extérieure de l'usine de Siemens Electronic works, *source : siemens.com*

L'usine se spécialise dans la production d'automates programmables qui sont par ailleurs exploité pour assurer le pilotage de la production. La conception de l'usine s'est basée sur une

approche rationnelle axée sur l'intégration d'open-spaces ainsi que le recours à des matériaux de construction performants, afin de s'offrir la possibilité de reconfigurer l'espace avec diligence quand la nécessité l'impose, accentuer l'efficacité énergétique et assurer les niveaux de confort optimaux aux différents usagers. (*Siemens Electronic Works, 2025*)

L'autre aspect qui caractérise le fonctionnement de « Siemens Electronics Works » est le fait qu'il repose sur un système technologique très avancé qui est auto-produit au sein de la même infrastructure. En intégrant des systèmes d'automatisation ainsi que des systèmes numériques, elle est parvenue à assurer la digitalisation de 99% du processus de production. Des capteurs sont posés sur chaque objet détectant toutes les données nécessaires en temps réel, permettant le réajustement et la correction instantanée des possibles défaillances. L'usine est en outre dotée d'une combinaison entre IOT et IA facilitant au système la prédiction des besoins et de toutes pannes pouvant survenir dans le système général. (*Siemens Electronic Works, 2025*)













Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4
Capteurs & Machines  Machines connectées  Capteurs temps réel  Atelier de production ouvert	Collecte & Réseaux M2M  Réseau interne  Transmission massive des données  Automatisation interne	Analyse IA & Jumeau numérique  Intelligence Artificielle  Simulation virtuelle des objets  Détection d'anomalies	Actions & Optimisation  Maintenance prédictive  Optimisation énergétique  Réglages automatiques

Tableau 03 : Démonstration des différents niveaux de digitalisation de l'usine de Siemens Electronic works,

source : Traitement personnel

Ce modèle de Siemens réambellit la réputation des brownfield, et démontre la possibilité de les transformer complètement en des sites technologiques entiers, dotés d'une répartition spatiale intelligente, sans avoir recours aux procédés de démolition et reconstruction, permettant une évolutivité à long terme, tout en gardant une productivité optimisée et une efficacité énergétique assez conséquente. (*Siemens Electronic Works, 2025*)

2.6. Usine de Bosch :

Le dernier exemple traité s'agit de l'usine de Bosch de Stuttgart-Feuerbach en Allemagne. Faisant suite à la volonté des directeurs pour numériser l'ensemble de la chaîne de production

tout en valorisant ses infrastructures existantes, cette infrastructure fut transformée en une usine intelligente en subissant un procédé de modernisation profonde par le biais des technologies de l'industrie 4.0. (BOSCH, 2025)



Figure 41 : Image de la façade principale de l'usine de Bosch, source : [bosch.fr](https://www.bosch.fr)

La rénovation qu'avait connu la structure industrielle touchait deux volets différents. Premièrement, l'usine Bosch avait entrepris une reconfiguration spatiale qui favorisait une répartition et une circulation efficace des flux de production, un zoning clair distinguant chaque fonction, ainsi qu'à la consécration de quelques zones de l'infrastructure pour la démonstration aux visiteurs et aux partenaires, mettant ainsi l'accent sur la commercialisation de leurs produits et leur permettant d'avoir une fenêtre directe sur les capacités de l'industrie 4.0. Les façades, en outre, ont connu une rénovation progressive avec l'incorporation de matériaux à haut rendement énergétique et écologique ; ceci tout en veillant à garder une esthétique industrielle sobre et élégante. (BOSCH, 2025)

Deuxièmement, l'usine s'est modernisée en qualité de processus. En digitalisant chaque équipement intervenant dans son procédé de production ainsi qu'en le connectant à un réseau IoT interne, en intégrant des technologies avancées à l'image de l'intelligence artificielle, les jumeaux numériques et le tableau de bord interactif, l'usine s'est offerte le privilège de la maintenance prédictive et se dotait d'une consommation énergétique efficace et durable. (BOSCH, 2025)

Par ces faits, l'usine Bosch s'est imposé comme un modèle de rénovation intelligente (greenfield) d'un site brownfield, prouvant que la quatrième révolution industrielle ne concerne pas que la « construction neuve ». (BOSCH, 2025)



Figure 42 : Schéma montrant le principe de digitalisation de l'usine Bosch, source : *Traitement personnel*

3. Conclusion : synthèse de l'analyse des exemples :

Exemple	Caractéristiques architecturales	Caractéristiques énergétiques
-La Smart Factory de Future Stitch	<ul style="list-style-type: none"> -Adoption d'un système structurel modulaire favorisant évolutivité et flexibilité. -Ségrégation fonctionnelle rigoureuse et circulation optimale assurant la liaison. -Façade modulaire fondées sur le principe de répétition. 	<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison d'un système actif et d'un système passif afin d'assurer l'optimisation des performances énergétiques du complexe : un système passif préconisant la bonne ventilation et ensoleillement à travers des dispositions spatiales ainsi qu'un système actif de gestion intelligente de l'énergie BMS.
-Trumpf Hungary Smart Factory / Barkow Leibinger	<ul style="list-style-type: none"> -Un zonage fonctionnel rigoureux -Organisation linéaire suivant la chaîne de production. -Ossature à grande portée en acier permettant l'obtention de larges surfaces libres. 	<ul style="list-style-type: none"> -Implantation et orientation favorisant les apports solaires passifs et minimisant les déperditions thermiques -Exploitation d'un système de gestion intelligente à base de capteurs IoT -Exploitation d'un système BMS permettant le contrôle et l'ajustement automatique des paramètres environnementaux internes. -Utilisation des vitrages à haut rendement énergétique.
-TRUMPF Smart	<ul style="list-style-type: none"> -Démantèlement de l'enveloppe en deux 	<ul style="list-style-type: none"> - une conception passive efficiente, grâce à une orientation et une

Factory Chicago	<p>volumes distincts à vocations disparates.</p> <p>-Un plan ouvert offrant une circulation et visibilité accentuées.</p>	<p>utilisation judicieuse de la végétation.</p> <p>- Utilisation de matériaux isolants à haut rendement assurant une enveloppe thermique renforcée et efficace.</p> <p>-Exploitation des équipements performants de conception (CVC) et des systèmes d'automatisation de machinerie, activés via des capteurs IOT ainsi qu'un système de gestion centralisé, contrôlant et ajustant la consommation d'énergie dans les différentes entités du projet.</p>
-Schneider Electric smart factory		<p>-Centralisation des données des équipements usines machines, capteurs et systèmes de gestion à la plateforme « EcoStruxure » permettant une surveillance en temps réel, un pilotage énergétique intelligent et une maintenance prédictive.</p>
-Usine Siemens d'Amberg	<p>-L'intégration d'open-spaces et de matériaux de construction performants, offrant la possibilité de reconfigurer l'espace en fonction des besoins, d'accentuer l'efficacité énergétique et d'assurer les niveaux de confort optimaux aux différents usagers.</p>	<p>- Exploitation de capteurs de détection de données en temps réel à travers toute l'infrastructure permettant le réajustement et la correction instantanée des possibles défaillances.</p> <p>-Une combinaison entre IOT et IA permettant d'atteindre la dimension prédictive souhaitée.</p>
-Usine de Bosch de Stuttgart-Feuerbach	<p>-Incorporation de matériaux à haut rendement énergétique et écologique.</p> <p>-Zonage fonctionnel rigoureux et consécration de zones spécifiques pour la démonstration commerciale.</p>	<p>-la maintenance prédictive grâce à l'incorporation de l'intelligence artificielle, des jumeaux numériques et du tableau de bord interactif</p>

Tableau 04 : Synthèse de l'analyse des exemples, *source : Traitement personnel*

**Chapitre IV : Cas d'étude :
Complexe de Production
Industriel Agroalimentaire
« Cevital »**

1. Introduction :

À ce stade de ce travail de recherche, l'analyse du cas d'étude s'avère indispensable, afin de parvenir à établir un parallélisme entre les notions théoriques, abordées précédemment, et un contexte industriel concret. Le choix, qui s'est porté sur le complexe agroalimentaire de Cevital, n'est guère anodin. Ce dernier représente un acteur incontournable de l'industrie digitalisée, non seulement au niveau local mais également sur le plan continental. Pour cela, j'ai effectué un stage pratique au sein de cette infrastructure qui m'a permis de la scruter du fond en comble ; tirant des enseignements importants pour enrichir davantage la réflexion érigée jusqu'à ce point de la recherche et alimenter la phase d'idéation de mon propre projet.

2.Présentation du complexe :

Le complexe agroalimentaire de Cevital est l'un des pôles industriels moteur d'Algérie se situant au port de la ville de Bejaia, fondée en 1998 et occupant une superficie dépassant le seuil de 45000 m². Il regroupe un ensemble d'unités de production spécialisées dans : le raffinage d'huile végétalisée, la production de sucre blanc et liquide, la fabrication de margarine ainsi que des boissons d'eau minérales et d'autres dérivés agroalimentaires futures.

3.Implantation Stratégique :

Le complexe de Cevital jouit d'un positionnement stratégique lui offrant un accès direct au port par le biais de silos portuaires connecté à une terminale de déchargement de 2000 tonnes/heure. Ceci favorise une optimisation des flux logistiques en facilitant l'importation des matières premières et l'exportation des produits finis, ainsi qu'il permet de créer un système de stockage rapide optimisant la production.

4.Evolution du complexe de Production :

Vers ses débuts, aux environs de l'an 1998, Cevital avait mis en service une unité de production d'huile alimentaire commercialisée sous la marque Elio. Deux ans plus tard, l'entreprise avait entamé un procédé de diversification touchant sa production, qui s'est manifesté en l'introduction de la production de la margarine, sous les deux labels Fleurial et Matina, le beurre tendre Gourmand ainsi que la production du Sucre. Ce procédé de diversification concernait non seulement les volets technique et machinerie, mais aussi le plan

architectural et l'organisation spatiale. Le fait de multiplier les domaines de production impliquait des extensions spatiales massives. Les extensions suivirent une logique horizontale dans laquelle on en rajoutait, par juxtaposition, des structures industrielles ayant des formes parallélépipédiques basiques dotées d'équipements actifs (énergie, machines, système HVAC, assainissement...etc.). Ordinairement, la logique de l'ajustement spatial linéaire suit parallèlement la ligne de production, afin d'éviter tout chevauchement et assurer l'adaptabilité de l'infrastructure ; or, ce n'est guère le cas dans le complexe agroalimentaire de Cevital.

5. Analyse architecturale : problématique spatiale :

La demande accrue à laquelle est confronté le complexe de Cevital, nécessite d'entreprendre des extensions à l'ossature existante et de procéder à une adaptation des nouveaux espaces ainsi que leurs systèmes actifs. Or, l'entreprise se heurte à des difficultés énormes en ce sujet. En effet, après avoir visité les lieux, nous avons constaté un manque flagrant d'espaces et d'aires dédiés ou qui sont susceptible de remplir le rôle d'extension future, que ce soit sur le plan horizontal ou bien vertical. Ceci n'est pas tout. Au fur et à mesure des visites effectués, les lacunes relatives à l'organisation et la gestion spatiale ne manquait pas de se rendre palpables. Un chevauchement compromettant dans les deux grands types de flux, en l'occurrence le flux de production et le flux des circulations, fut constaté. Ce dernier point est engendré par les extensions précédentes effectuées aléatoirement sans aucune prise en considération de la notion d'évolutivité. En outre, en étant sur les lieux, on a observé une qualité médiocre des confort de tous les acteurs utilisant l'infrastructure, comme les nuisances sonores extrêmes malgré l'usage d'ouvertures en double vitrage qui s'est avéré insuffisant en plus de l'absence complète d'ouvertures dans quelques espaces à l'images de la salle de contrôle, ainsi qu'un manque visible dans les normes de sécurité telle que la signalisation insuffisante et l'état délabré de quelques bâtisses. L'allure générale des bâtiments composant l'usine, à savoir leur forme et leur texture, constitue également un objet de débat avec des formes et textures à la fois aléatoires et insignifiantes. Toutefois, le complexe de Cevital, est doté d'un système de gestion des déchets qui est assez efficient, et jouit d'un système de stockage en silos qui garantit une rapidité de stockage et de production.

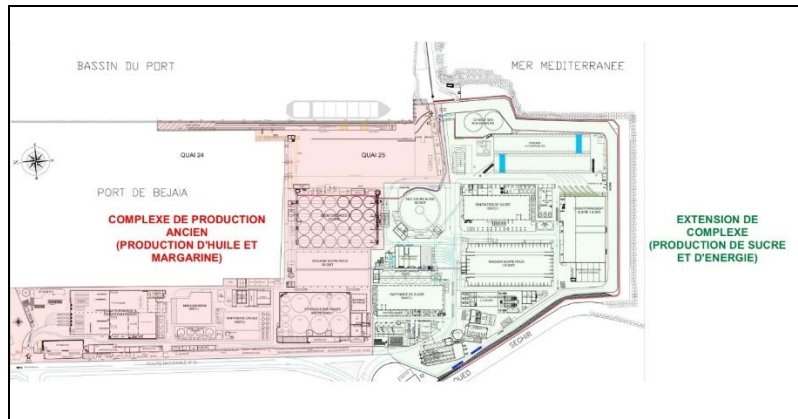


Figure 43 : Carte illustrant l'évolution spatiale du complexe de Cevital, *source : Carte personnelle*

6. Fonctionnement énergétique du complexe :

Cevital détient un système de couplage qui sert à alimenter le système de cogénération (autoproduction). Le système de couplage est associé avec les réseaux de la société nationale de l'électricité et du gaz « Sonelgaz ». Il fonctionne selon deux systèmes distincts : premièrement, dans le cas où survient une panne mécanique dans le réseau principal de Cevital, cette dernière se raccorde provisoirement du réseau de Sonelgaz en contrepartie d'une compensation financière ; toutefois, dans le cas opposé, où survient une surabondance électrique dans ses réseaux, elle doit transférer du courant électrique au réseau de la société nationale, et ceci sans rémunération.

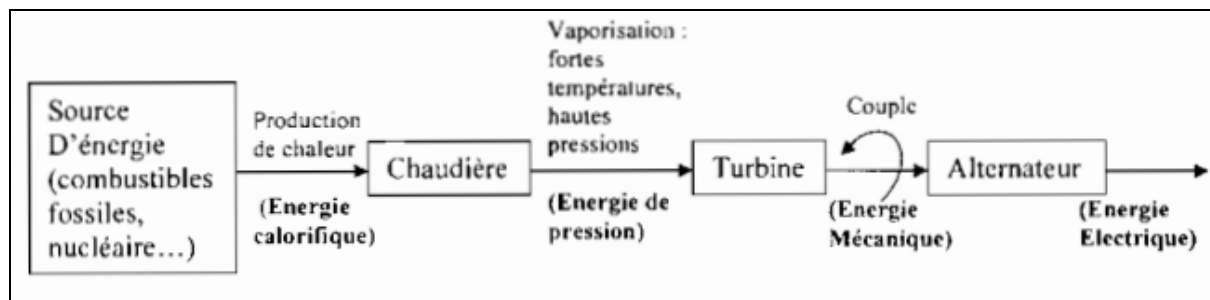


Figure 44 : Schéma illustrant le fonctionnement énergétique du complexe de Cevital, *source : Traitement personnel*

La cogénération est la génération simultanée de puissance (mécanique, électrique) et d'énergie thermique utile, à partir d'une même énergie primaire et au sein de la même installation. Les configurations de cogénération peuvent être réparties en deux groupes : Les cycles en amont, dans lesquels la chaleur produite par l'énergie primaire est utilisée pour générer de l'électricité. La chaleur rejetée est, ensuite, récupérée sous forme de vapeur, ou d'eau chaude.

Les cycles en aval, où l'énergie primaire est utilisée pour produire de la chaleur pour un processus industriel. La chaleur rejetée sera récupérée pour être convertie en électricité.

Les ressources énergétiques de la cogénération sont des sources non renouvelables, contrairement aux énergies solaires, hydroélectrique, géothermique, éolienne etc. les énergies fossiles résultent d'une accumulation d'énergie solaire captée par des êtres vivants pendant des millions d'années. Elles regroupent trois sources d'énergie que l'on connaît bien comme issues de combustibles fossiles, à savoir le pétrole, le gaz et le charbon.

Le système de cogénération permet de récupérer la chaleur ordinairement perdue en générant de l'électricité et la valorisant pour des répondre à, des besoins thermiques à l'image du chauffage, l'alimentation en eau chaude et autres procédés industriels. Il permet, donc, d'accentuer palpablement la performance énergétique globale de l'infrastructure, qui peut atteindre en quelques cas les seuils de 60 à 90%, contre 25 à 55% dans des infrastructures adoptant une production électrique conventionnelle. En outre, en se penchant sur le volet économique, la valeur produite en électricité constitue le levier clé, grâce à sa facilité de transport et sa polyvalence. Toutes, en sachant que dans le but d'optimiser une installation destinée à répondre à des besoins thermiques, il est recommandable d'incorporer une production d'électricité, or, pour le cas de Cevital, et d'après nos constatations, ce n'est absolument pas le cas. En effet, parmi les dix-sept bouilleurs que détient l'usine, deux bouilleurs seulement assurent la fonctionnalité de celui-ci. Ceci revient à des défaillances associées à la conception. En ayant causé avec les ingénieurs sur place, ils nous ont informé que l'entreprise chargée de l'investigation et de l'étude d'alternatives s'est prononcée à cet égard, en assertant que le dilemme réside dans la structure ainsi que l'organisation spatiale du complexe.

Au niveau de l'usine de Cevital, les besoins en eau sont couverts par deux sources principales. L'une est une eau de forage issue d'un puits artésien située au lieu-dit Iboulassen, dans la commune d'Oued Ghir à environ 12km du complexe. Cette source est composée de trois puits ouverts. Chaque puits possède une pompe à environ 40m de profondeur, qui envoie environ (9000-10000) m³ /jour. L'autre source est située au niveau de Tichyhaff (Bejaïa), sous forme d'un barrage d'eau qui expédie, après traitement, un débit d'environ 4000 m³ /jour (Manuel du complexe Cevital).

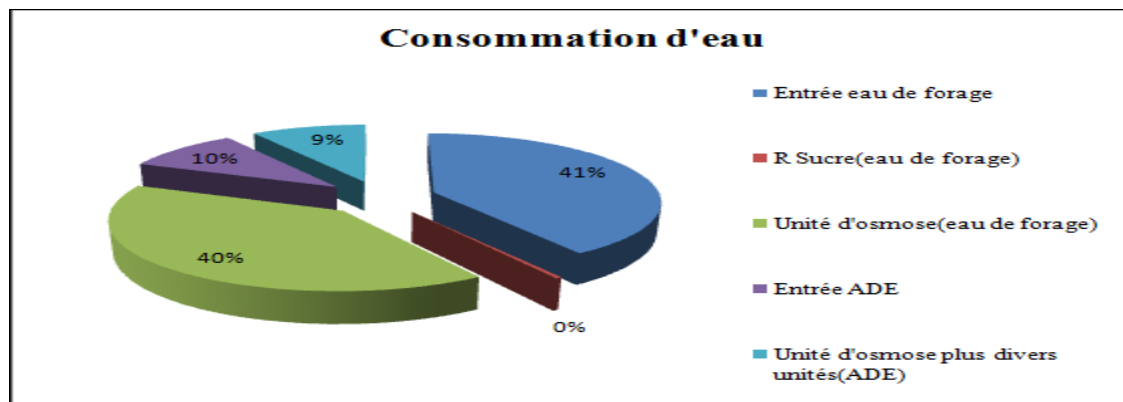


Figure 45 : Diagramme illustrant les consommations en eau de forage du complexe de Cevital pendant l'année 2014 source : *diagramme personnel*

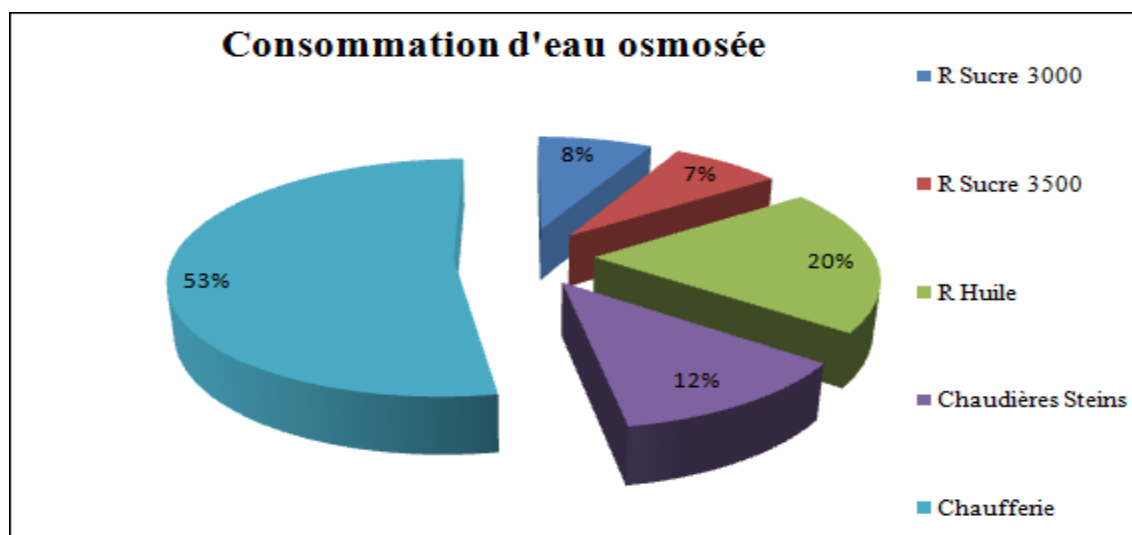


Figure 46 : Diagramme illustrant les consommations en eau d'osmose du complexe de Cevital pendant l'année 2014 source : *diagramme personnel*

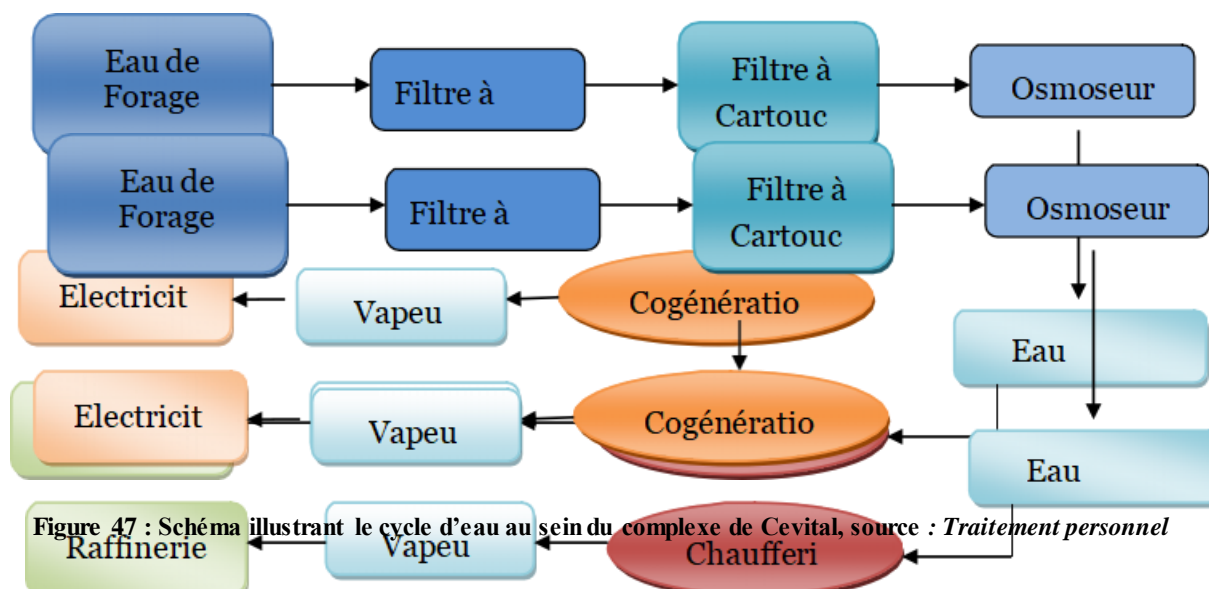


Figure 47 : Schéma illustrant le cycle d'eau au sein du complexe de Cevital, source : *Traitement personnel*

7. Conclusion :

Après l'achèvement de cette analyse exhaustive de notre cas d'étude qui consiste en le complexe de production Cevital, nous pouvons d'ores et déjà sortir avec quelques synthèses critiques qui concernent la gestion énergétique de l'usine. Premièrement, on constate clairement la dépendance de la fonction générale de l'usine envers l'eau. Or, d'après les entretiens effectués avec le personnel du complexe, il s'est avéré que la source du forage exploité à Iboulassen, ne répond plus avec plénitude à ses besoins et connaît une baisse palpable dans ses rendements ; en plus du fait que, l'état Algérienne s'apprête à interdire l'exploitation de ces sources d'eau dans les deux ans à venir, pour remédier au problème de l'épuisement des ressources naturelles. Ce qui fait que le complexe de Cevital se trouve confronté à un problème majeur qui risque de compromettre l'existence même de l'entreprise. Toujours en se basant sur les propos des ingénieurs consultés, Cevital en cherchant les alternatives, elle s'est penchée sur la substance du Gaz, mais les prix incessamment flambants les ont dissuadés, et l'ont fait repencher sur une autre alternative qui leur permettrait, dorénavant, de détenir une station de dessalement des eaux. En effet, elle avait entrepris des pourparlers avec l'état dans le but de se procurer une station de dessalement, afin d'en finir avec la dépendance excessive de l'usine envers l'extraction des eaux de source, or l'état Algérienne leur avait octroyé une station située aux environs du lieu-dit Tighremt, qui, d'après les ingénieurs de l'entreprise, présente des soucis énormes quant au captage des eaux, ce qui fait qu'elle ne pourra en aucun cas répondre aux besoins de l'usine.

Hormis la problématique de la production énergétique, l'infrastructure du complexe, comme on l'avait précisé précédemment, manifeste des soucis grandioses quant à la gestion et l'organisation spatiale. Le fait que la conception initiale ne fut absolument pas concertée dans une optique d'évolutivité, accumulé par les extensions qui continuaient dans le même principe de juxtaposition spatiale aléatoire, avait généré une infrastructure extrêmement vulnérable en termes d'organisation spatiale. Enfin, on peut déduire que le complexe de Cevital, quoique hautement réputé, ne peut en aucun cas s'insérer dans le cadre de l'industrie 4.0. En effet, hormis l'optimisation se bornant aux systèmes de production de l'énergie, aucun autre dispositif d'automatisation n'est incorporé dans le reste des procédés qui adoptent des systèmes conventionnels.

8. Simulation numérique :

Après avoir achevé l'analyse du cas d'étude, désormais, est venu le moment de se pencher sur celui-ci d'une approche plus appliquée. La simulation numérique qu'on s'apprête d'établir va nous permettre d'évaluer la pertinence des données énumérés ci-dessus, et nous offre l'opportunité d'explorer l'efficacité de quelques solutions et de les optimiser avant d'aborder notre propre projet, dans les chapitres à venir.

8.1. Méthodologie et phasage :

Le processus s'est déroulé sur plusieurs phases. Au premier lieu, dans le but d'obtenir des résultats faciles à interpréter, on a daigné à se borner à une simulation se portant sur le bâtiment destiné à la raffinerie d'huile du cas d'étude. L'étape suivante consistait à effectuer un relevé architectural de celui-ci, ainsi qu'une prise de mesure relative aux données thermiques et d'éclairages qui le caractérisent, à l'aide d'un Thermomètre et d'un Luxmètre. Les données que nous avons préconisées, afin de nous porter une aide lors de la simulation numérique, se relatent aux températures moyenne au sein du bâtiment et maximale près des machines, les facteurs de lumière de jour moyen et maximal ainsi que des données associées aux type d'éclairage artificiel exploité et mécanisme d'éclairage naturel.

A l'issue de cette démarche, et dans le but de collecter un maximum de données qui nous faciliterons l'interprétation des résultats de la simulation, nous avons procédé à des entretiens encadrés avec quelques ouvriers et ingénieurs pratiquant sur place. En effet, nous avons préalablement préparés un ensemble de questions qui concernent les mécanismes de chauffage de refroidissement ainsi que des questions se relatant au confort et bien être de ceux-ci au sein de leur environnement de travail.

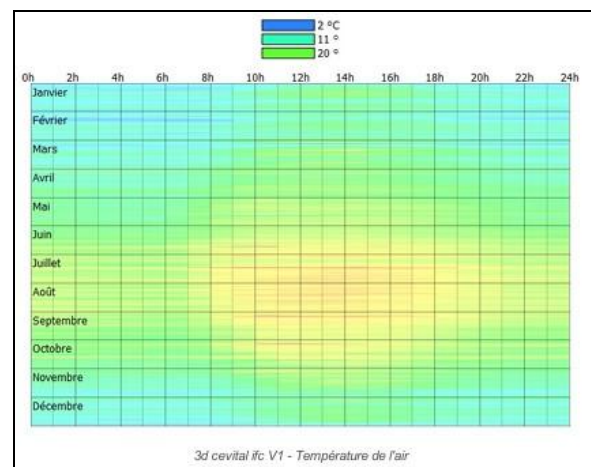
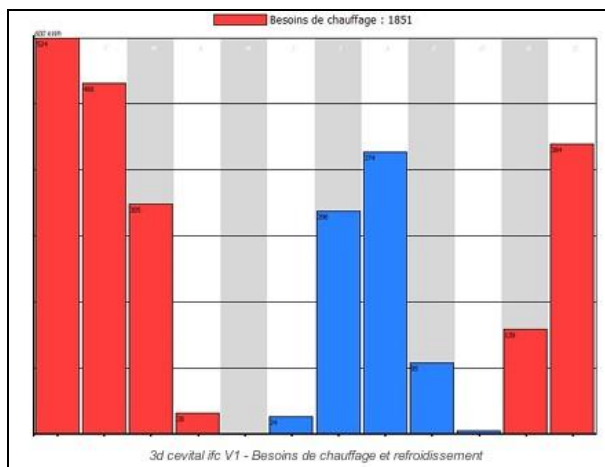
Toute une constellation de données, donc, fut collectée. Les réponses nous ont révélé l'absence complète d'un système de chauffage pour des nécessités fonctionnelles, ainsi que l'absence d'un système de refroidissement dans cette entité qui se contente de prodiguer des boucles à Aero se chargeant du refroidissement des machines. En outre, nous avons constaté l'utilisation de panneaux sandwich pour la construction des parois, des ouvertures basiques à simple vitrage servent à assurer l'éclairage naturel de l'espace ainsi que l'exploitation de bandeaux fluorescents comme dispositif d'éclairage artificiel.

Comme indiqué dans la partie introductive de ce chapitre, le choix s'est porté sur le logiciel ArchiWizard pour effectuer cette simulation numérique. Celle-ci se divisera selon deux scénarios distincts. Le premier scénario que nous allons proposer est basé sur les données réelles récoltées lors de la visite guidée, des entretiens et des relevés effectués. Tandis que le second sera plutôt effectué pour un modèle raffiné et optimisé à partir des recommandations et enseignements retenues de la simulation initiale.

8.2. Résultats de la simulation :

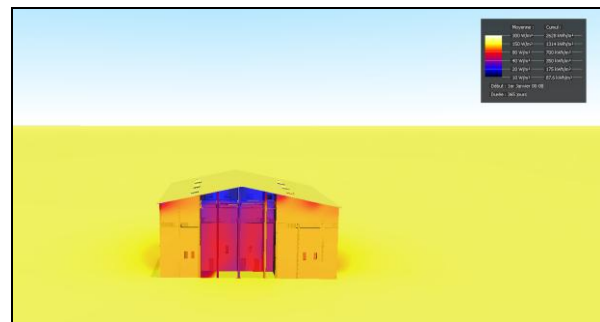
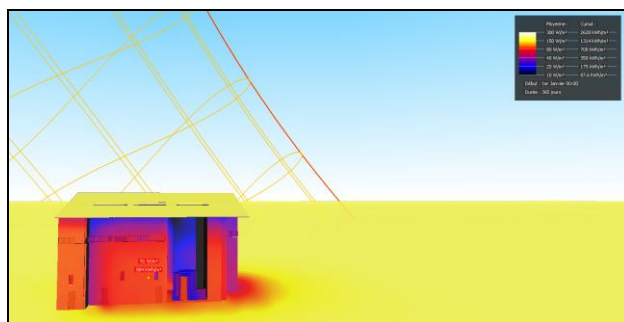
8.2.1 Scénario initial :

La simulation dynamique à travers ArchiWizard, est effectuée en incorporant les apports solaires, les attributs thermiques et optiques relatifs aux matériaux de construction ainsi que la localisation géographique qui est associée au complexe agroalimentaire de « Cevital », et les données climatiques qui y affèrent.



Figures 48 et 49 : Diagrammes relatifs aux besoins de chauffage et refroidissement ainsi qu'à la température de l'air du cas d'étude,

source : Archiwizard



Figures 50 et 51 : Prises révélant les conditions thermiques du cas d'étude, source : ArchiWizard

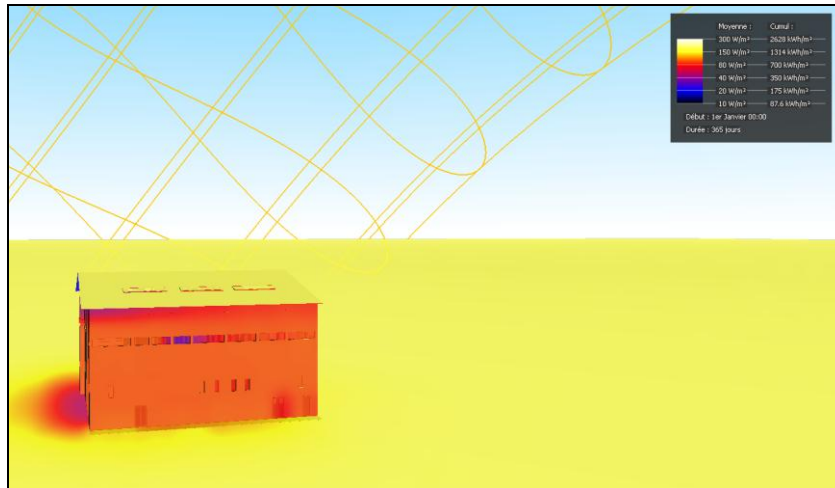
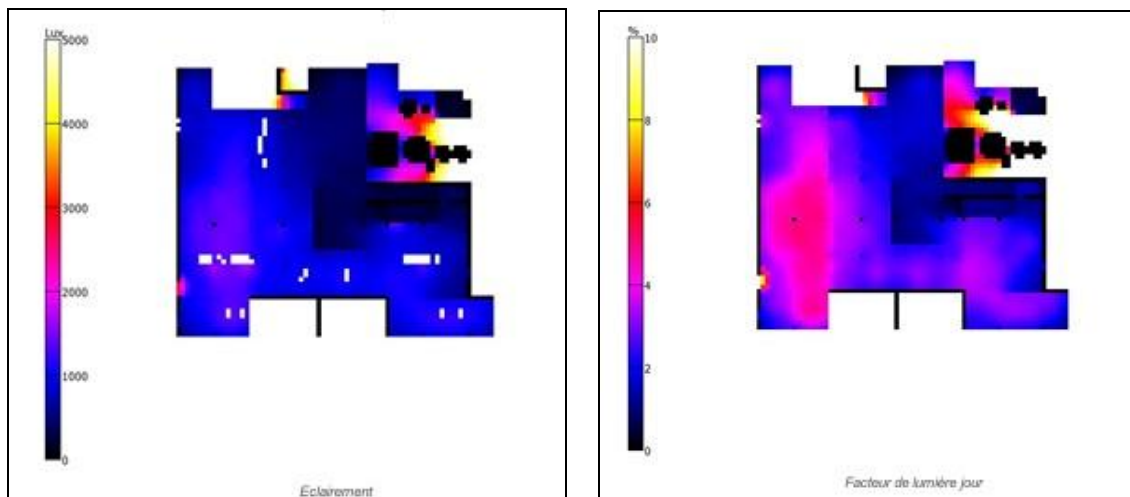


Figure 52 : Prise révélant les conditions thermiques du cas d'étude, source : ArchiWizard

Les résultats de la simulation effectuée à l'aide du logiciel de simulation énergétique ArchiWizard furent pertinents. En effet, les températures détectées suite à la simulation, qui furent de l'ordre de 28°C comme température ambiante moyenne et 31°C comme température maximale, sont relativement les mêmes données obtenues lors de la prise de mesure.

Les résultats de ce premier scénario attestent des besoins de refroidissement relativement élevés, dues foncièrement aux propriétés des matériaux de construction exploités pour l'enveloppe du bâtiment, qui présentent dans leurs caractéristiques une inertie thermique assez basse, ainsi qu'à l'absence d'un système central de refroidissement.



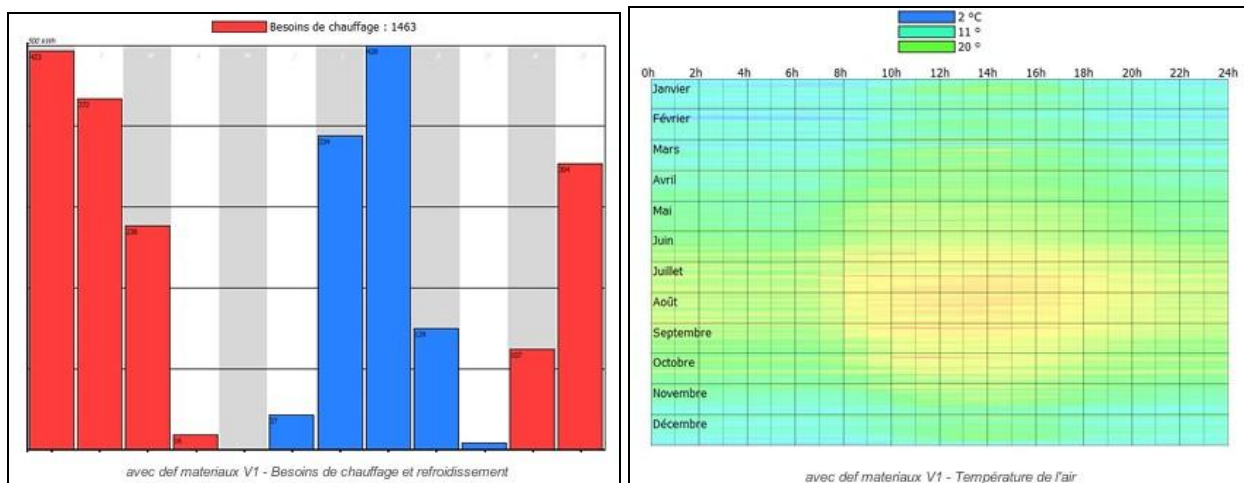
Figures 53 et 54 : Carte révélant le degré d'éclairement et du facteur de lumière de jour au sein du cas d'étude, source : ArchiWizard

Les résultats de la simulation relative à l'éclairage révèlent un éclairage reçu moyen de 24 722 Lux, un éclairage reçu maximum de 51 549 Lux, un facteur de lumière du jour (FLJ) moyen s'élevant aux hauteurs de 47,4%, un facteur de lumière du jour (FLJ) maximum de 97,2%, un ratio de surface respectant la formule $FLJ \geq 2$ de 87%. Ces données s'avèrent satisfaisantes en s'insérant parfaitement dans les normes d'éclairage d'une raffinerie ; dès lors, le système d'éclairage venant consolider le système d'ouvertures adopté est jugé largement suffisant pour remplir son rôle.

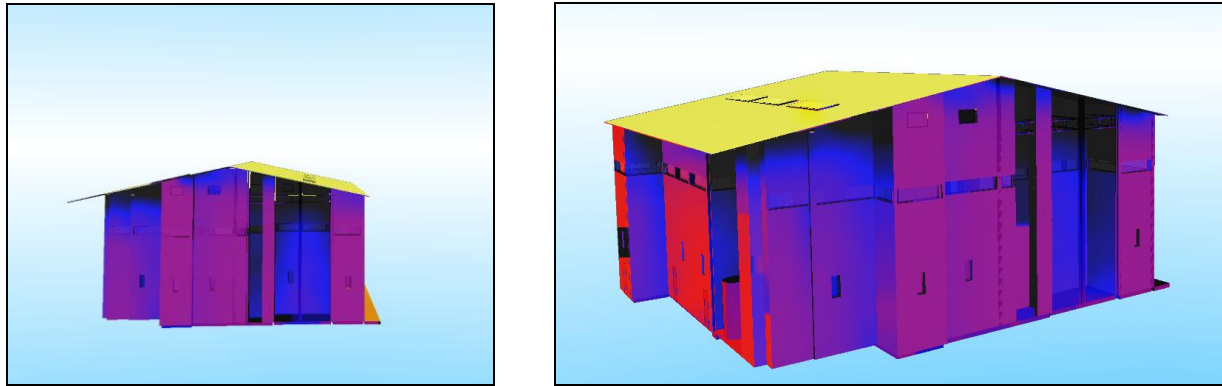
8.2.1.1. Recommandations :

Les résultats ressortis à partir des études thermiques et lumineuses nous permettent de ressortir avec quelques recommandations, que nous allons adopter pour la simulation du deuxième scénario. Les recommandations qui vont nous permettre d'améliorer les performances de ce bâtiment se relatent à l'adoption d'un système de refroidissement, qui est associé à un système de récupération de chaleur. Ce dernier doit être doté d'un ensemble de capteurs thermoélectriques, qui récupèrent la chaleur émise par les machines afin de l'exploiter dans les systèmes de climatisation centrale et de refroidissement des machines. Elles se relatent, en outre, à la préconisation de vitrages ayant un facteur solaire modéré et une haute performance thermique, le renforcement de l'isolation thermique des parois sans compromettre l'apport en lumière naturelle, ainsi qu'à la préconisation des protections solaires passives.

8.2.2 Second Scénario :



Figures 55 et 56 : Diagrammes relatifs aux besoins de chauffage et refroidissement ainsi qu'à la température de l'air du cas d'étude dans le cadre du deuxième scénario, source : Archiwizard



Figures 57 et 58 : Prises illustrant les conditions thermiques sur les façades du cas d'étude dans le cadre du deuxième scénario, source : ArchiWizard

Après avoir apporté les substitutions nécessaires, suivant les recommandations issues de la simulation n°01, au modèle analysé, on l'avait exposé à une simulation numérique.

Les résultats de l'étude thermique montrent une nette amélioration. En effet, les besoins de refroidissement ont connu une régression palpable, allant parallèlement avec les températures ambiantes s'avérant plus fraîches : la nouvelle température opérative moyenne est estimée à 26°C tandis que la température opérative maximale s'élève aux environs de 29,5°C.

L'étude d'éclairage indique, après les substitutions apportées au modèle étudié, un éclairage reçu moyen de 10 208 Lux, un éclairage reçu maximum de 33 728 Lux, un facteur de lumière du jour (FLJ) moyen s'élevant aux hauteurs de 31,5%, un facteur de lumière du jour (FLJ) maximum de 92,2%, un ratio de surface respectant la formule $FLJ \geq 2$ de 78%. Quoiqu'on constate une réduction nette des apports solaires au sein du bâtiment, survenant à cause du renforcement de l'inertie thermique de l'enveloppe, or les résultats demeurent satisfaisants et offrant un environnement de travail très bien éclairé.

8.3. Synthèse :

La simulation numérique qu'on vient d'effectuer, dans le cadre de l'analyse du cas d'étude « Cevital », vient nous apporter une preuve indéniable de l'importance majeure que revête la nature des matériaux de construction ainsi que des systèmes constructifs dans les performances énergétiques d'un complexe de production. En effet, les modifications apportées dans le cadre de la deuxième simulation, quoiqu'elles demeurent infimes, ont conduits à une amélioration palpable dans les besoins thermiques globaux de l'entité de raffinement.

Ceci dit, on va désormais se pencher sur l'analyse du site d'intervention.

Chapitre V :

Analyse du site d'intervention

1. Le site d'intervention : Présentation et critères du choix :

L'assiette d'intervention est localisée au niveau de la zone industrielle de la ville de Bejaia. Pour être plus précis, il s'agit du terrain qui recevait jadis l'enceinte d'usine de métallurgie (ENMTP), qui aujourd'hui est considéré telle une friche urbaine en état délabré.

Ce site d'intervention est choisi en raison de son emplacement stratégique au cœur de la ville de Bejaia, et sa proximité des différents services (le port, infrastructure routière, transport public, commerce et autres services ...etc.). Par ailleurs, l'exploitation de cette friche urbaine va procurer une aubaine à la ville de Bejaia, en l'extirpant des effets nuisibles qu'est susceptible d'engendrer le délaissement d'un site industriel. En outre, il nous offre l'opportunité d'expérimentation pour un nouveau type de conception, pour ces complexes de production industriels, axée davantage sur des mécanismes philanthropiques.

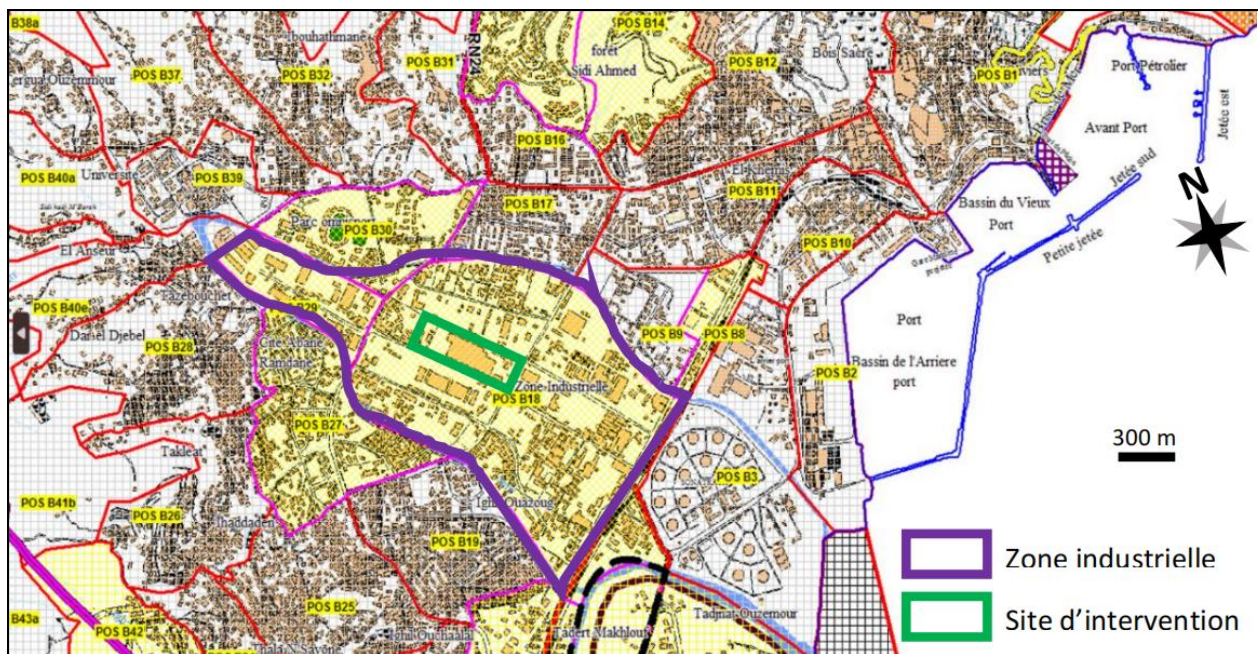


Figure 59 : Carte illustrant la situation du site d'intervention, source : *Carte extraite du PDAU intercommunal*

2.Limites, Accessibilité et Repères :

Le terrain qui s'étale sur une superficie estimée à 89967.62m², est caractérisé par une morphologie relativement plate, et est accessible à partir de la rue des Aurès.

Le terrain possédait une facilité d'accessibilité et de détectabilité grâce aux multiples points de repères (terrain perméable et visible)



Figure 60 : Carte illustrant les limites, l'accessibilité et les repères notables du site d'intervention,

source : Carte traité par le logiciel AutoCad

3. Typologies de Bati Existant :

Le terrain est limité par une large gamme de vocations de bâti. Entre autres on retrouve l'industrie, l'habitat, le commerce, des bureaux administratifs ...etc. La typologie dominante est l'industrie suivie par les immeubles d'habitation.



Figure 61 : Carte illustrant les différentes typologies de construction autour du site d'intervention,

source : Carte traité par le logiciel AutoCad

4. Allure urbaine :

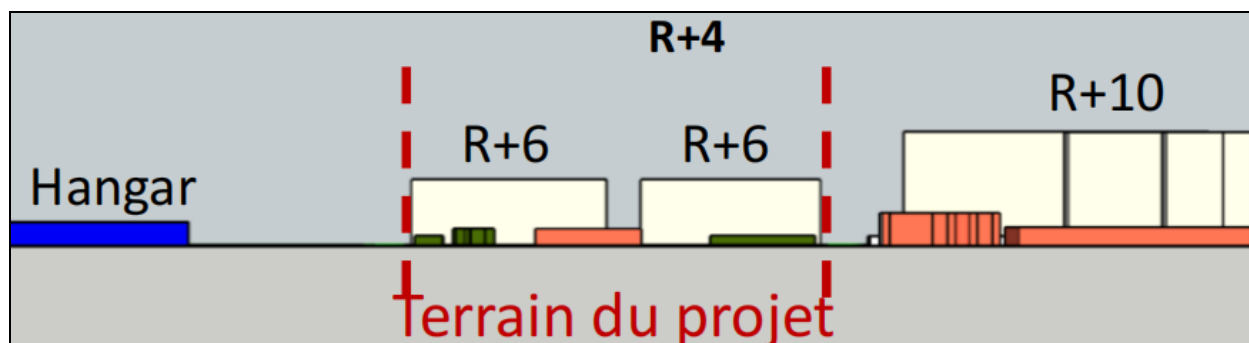


Figure 62 : Coupe schématique transversale du site d'intervention, *source : Traitement personnel*

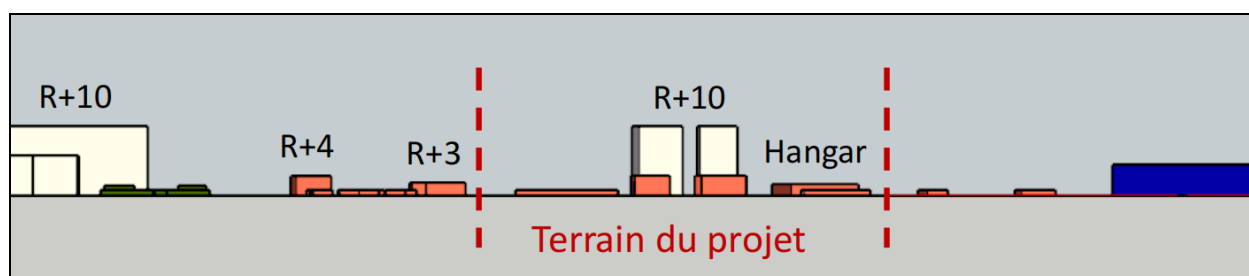


Figure 63 : Coupe schématique longitudinale du site d'intervention, *source : Traitement personnel*

Les gabarits d'immeuble résidentiels varient entre des R+6 et des R+10, tandis que les constructions à caractère administratives et à vocations commerciales ne dépassent pas les R+4. Les hangars de leur côté ne dépassent pas la hauteur d'un immeuble R+3. L'allure générale autour de l'assiette d'intervention est caractérisée par une discontinuité de la trame et de la façade urbaine, ainsi qu'une concentration faible d'immeubles à proximité de ses quatre confins.

Les bâtiments situés à l'intérieur du périmètre d'analyse sont dotés de façades contemporaine, marquées par le jeu de décrochements et de couleurs ainsi que des façades vitrées et traitées en plaques de résine (GRC).



Figures 64, 65 et 66 : Illustrations montrant les façades des immeubles avoisinant le site d'intervention, source : photos prises le 05/04/2025

5.Caractéristiques Physiques de site :

5.1. Ensoleillement :

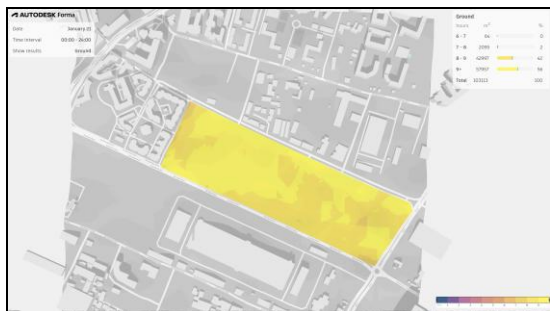


Figure 67 : Simulation d'ensoleillement durant la saison d'hiver, source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard

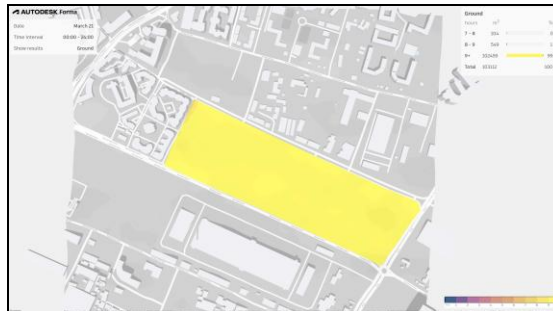


Figure 68 : Simulation d'ensoleillement durant la saison du printemps, source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard

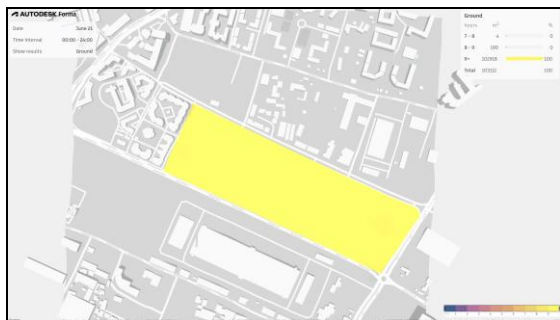


Figure 69 : Simulation d'ensoleillement durant la saison d'été, source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard

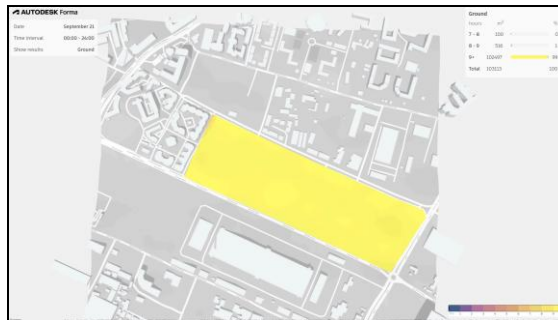


Figure 70 : Simulation d'ensoleillement durant la saison d'automne, source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard

Constat : 80% du terrain bénéficie de plus de 9 heures de soleil, offrant un fort potentiel pour les panneaux solaires et les espaces verts, avec un besoin éventuel d'ombres pour Prévenir la surchauffe en été.

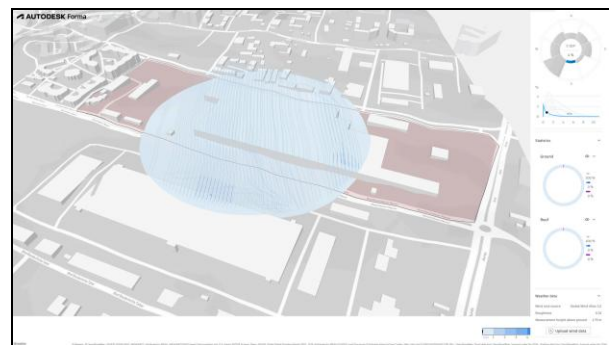
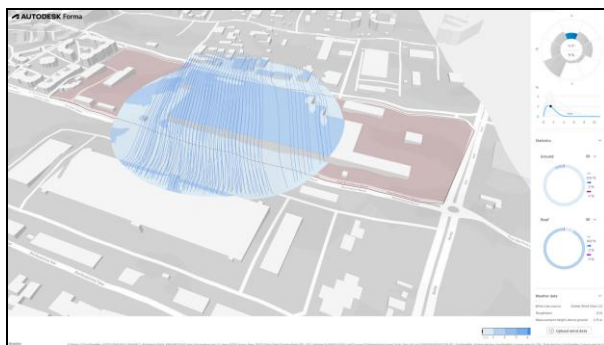
5.2. Eclaircement :



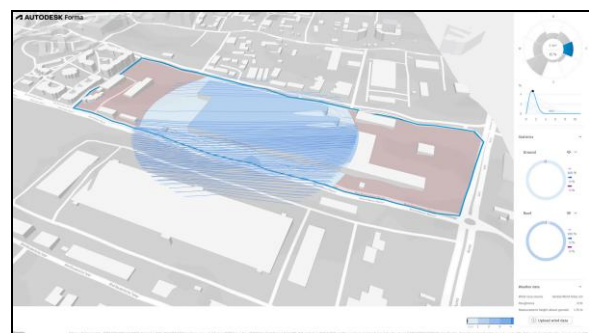
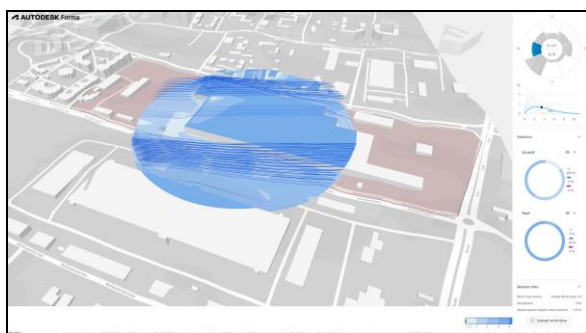
Figure 71 : Simulation de l'éclaircement, source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard

Constat : Le terrain bénéficie d'un éclaircement de plus de 70% offrant un éclairage naturel optimal.

5.3. Les vents dominants :



Figures 72 et 73 : Simulation du comportement du vent venant du Nord et du sud, source : Cartes traitées avec le logiciel ArchiWizard



Figures 74 et 75 : Simulation du comportement du vent venant des cotés Est et Ouest, source : Cartes traitées avec le logiciel ArchiWizard

Constat : Le terrain est exposé aux vents dominants d'Ouest (270°), caractérisés par une faible intensité (0-4 m/s), favorables à la ventilation naturelle.

5.4. L'humidité :

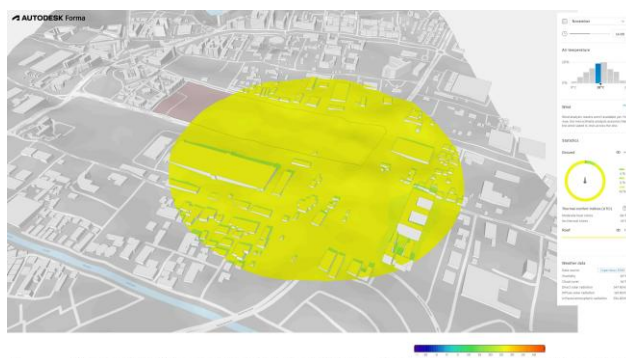


Figure 76 : Simulation du facteur de l'humidité, *source : Carte traitée avec le logiciel ArchiWizard*

Constat : Les résultats montrent un environnement majoritairement confortable, mais avec des zones nécessitant des ajustements pour réduire le stress thermique et les îlots de chaleur.

6. Synthèse :

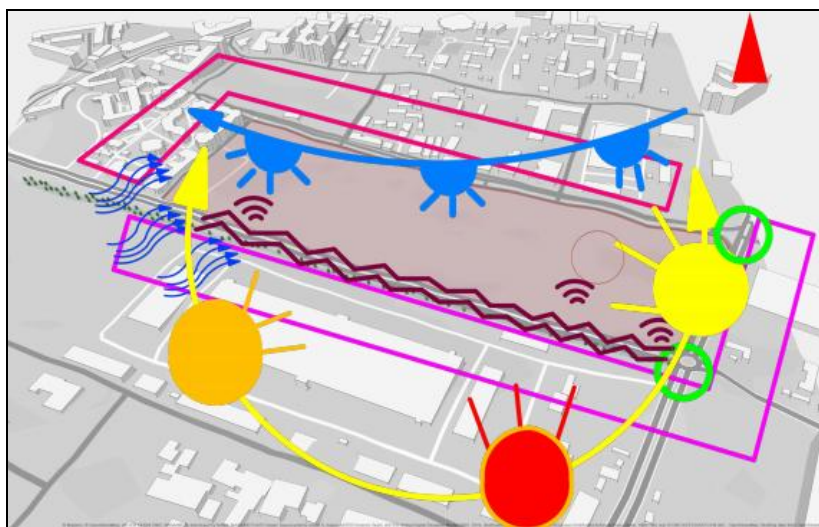


Figure 77 : Carte synthétisant les divers facteurs climatiques influant le site d'intervention, *source : Traitement personnel par le logiciel SketchUp*

À l'issue de l'analyse du site d'intervention, on va procéder à l'élaboration d'une synthèse de celle-ci. La synthèse revêtira la forme d'une grille d'analyse SWOT, dans laquelle seront énumérés l'ensemble des points forts ainsi que les lacunes que présente la zone industrielle de Bejaia.

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> -Site présentant une morphologie plate et une forme relativement régulière ; -Zone présentant une variété de typologies et de vocations (industrie, commerce, habitations privées, habitat collectif) ; -Situation du site à proximité de réseaux routiers principaux ; -Situation près du pôle socio-économique de la wilaya de Bejaia ; -Site présentant un micro-climat confortable ; -Perméabilité et visibilité aisée du terrain. -Bâtiments avoisinant présentant des façades contemporaines de style high-tech . 	<ul style="list-style-type: none"> - Insuffisance des aires viabilisées à la circulation piétonne ; -Non matérialisation des nœuds urbains à proximité du site ; -Manque flagrant de la végétation et des aires vertes ; -Existence de nuisances sonores constantes à proximité du site, spécifiquement durant le jour.
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> -Liberté accrue dans le choix de principes conceptuels et de systèmes structurels ; -Possibilité de concevoir un projet « autarcique » en incorporant une multitude de vocations ; -Facilité de manipuler et de positionner, à notre gré, les accès et sorties du projet ; -Facilité d'atteindre une implantation optimale et une orientation bénéfique pour toutes les entités composant le projet ; -Possibilité de prévoir des façades singulières contribuant à l'optimisation des consommations énergétiques et au confort intérieur tout en s'intégrant parfaitement avec l'environnement immédiat. 	<ul style="list-style-type: none"> -Baisse de l'attractivité urbaine et création d'un environnement moins sécurisé à cause du manque des trottoirs et des aires destinées à la circulation piétonne ; -Dégradation de la qualité de l'air, essor de maladies respiratoires et dévalorisation urbaine à cause de l'insuffisance de la flore ; -Dégradation du cadre de vie et création d'un climat empreint d'anxiété à cause des nuisances sonores.

Tableau 05 : Synthèse de l'analyse SWOT, source : *Traitement personnel*

7. Analyse complémentaire :

L'étape suivante est indispensable afin de parvenir à l'étape de conception dans les meilleures dispositions possibles. Le projet qu'on aspire concevoir concerne un complexe de production intelligent spécialisé dans la production de textile. Ce dernier ne fut l'objet d'un choix aléatoire. Les motifs nous ayant conduit à opter pour une infrastructure industrielle de textile sont multiples. Au premier abord, on retrouve les recommandations du PDAU intercommunal de la wilaya de Bejaia qui dicte les vocations réservées à chaque secteur. Par ailleurs, le choix s'est effectué dans une optique de valorisation des ressources locales, et de création d'une dynamique favorisant la diversification économique et résultant en la réduction de la dépendance à l'égard des importations. Cette stratégie s'insère, également, dans le cadre de la politique Algérienne visant à l'éradication du phénomène de chômage, en permettant de générer des postes d'emploi assez diversifiés. Finalement, l'état délabré dans lequel se trouve quelques infrastructures industrielles implantés dans la ville de Bejaia, ainsi que la pénurie constatée dans les établissements destinés à la production de textile, qui représentent moins de 5% de l'ensemble de l'infrastructure industrielle nationale, constituent des motifs majeurs nous ayant incités à opter pour un complexe industriel de textile.

Dans le cadre de notre démarche, et dans le but de disséquer davantage cette typologie inconventionnelle d'infrastructure industrielle, nous allons entreprendre une analyse de deux modèles d'usines spécialisées dans la production de textile. L'un s'agit d'un ancien établissement, tandis que l'autre est un prototype récemment rénové afin de suivre la marche de performance et de flexibilité contemporaines. Cette double analyse, qui jointe aux premiers exemples exposés dans la partie précédente, nous facilitera la tâche de ressortir avec les premières recommandations de conception, englobant le programme surfacique adéquat à notre complexe ainsi que les besoins fonctionnels tout en gardant l'œil sur les contraintes techniques et les objectifs à la fois énergétiques et environnementaux.

7.1. Analyse de l'Usine de Balsan "le précurseur de la révolution industrielle":

7.1.1.Genèse Historique :

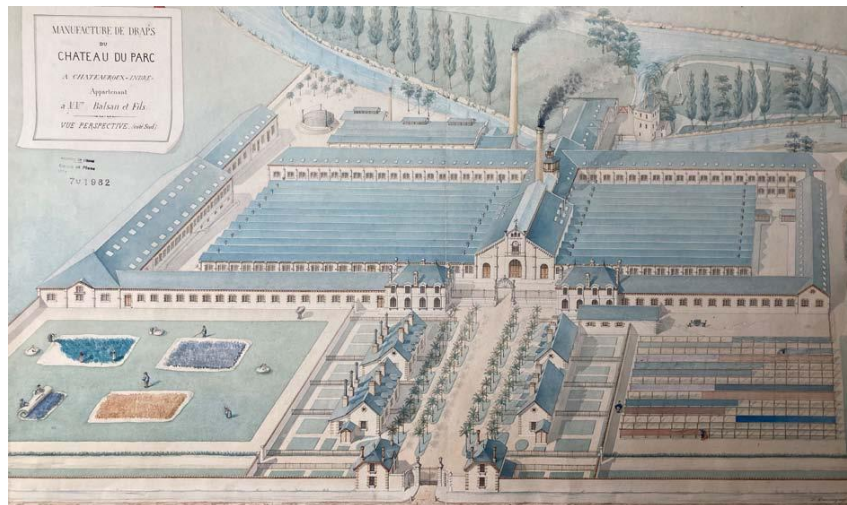


Figure 78 : Illustration de l'usine de Balsan ,source : museedelachemiserie.fr

La manufacture de Draps fondée en 1751, est située à la ville de Châteauroux-Indre en France. Elle s'étale sur une surface de 60000 m². Elle se distingue par le fait qu'elle s'agit de la première usine de textile qui, durant la révolution industrielle et après s'être appropriée par Jean Pierre Balsan, se lançait dans la fabrication de produits destinés à l'institution militaire.

Vers l'an 1870, l'usine Balsan subissait des transformations majeures. L'architecte Alfred Dauvergne avait pris en charge la mission de la transformer en une infrastructure adaptée aux exigences de l'industrie moderne. Il conçoit, alors, un modèle emblématique invoquant l'architecture industrielle typique du XIXe qui se distinguait par une monumentalité brutale accompagnée par une fonctionnalité judicieuse de son système spatial. L'usine jouera ensuite un rôle majeur dans le développement économique de la France ; à son apogée, le complexe employait plus de dix mille personnes. (Méry-Barnabé, 1951)

Généalogie des transformations de l'usine Balsan (Châteauroux)

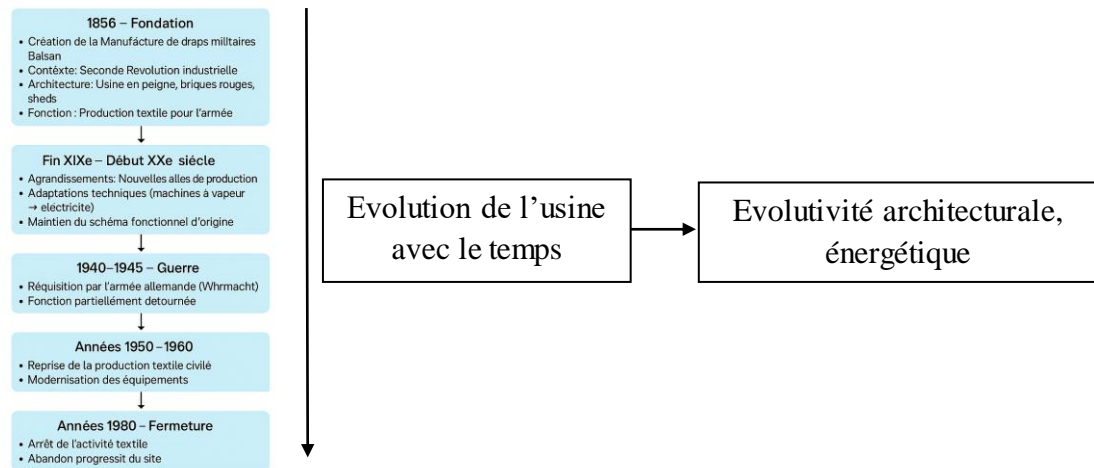


Figure 79 : Schéma de l'évolution de l'usine de Balsan, source : *Traitement personnel*

7.1.2. Organisation et fonctionnement spatial de l'usine :

Le côté Nord de la manufacture est délibérément élevé d'une manière à obtenir l'effet de monumentalité, qui permet d'apercevoir l'équipement depuis la route de Tours. Au centre on trouve un édifice à la fois, symbolique et fonctionnel, qui est nommé le bâtiment de l'Horloge qui constitue le centre de production d'énergie mais également est érigé afin d'incarner le pouvoir patronal. Tandis que du côté sud, l'usine est organisée suivant un schéma linéaire. L'organisation globale de l'usine Balsan se base sur un zonage fonctionnel ainsi qu'une hiérarchisation en fonction des étapes de la production. (*Méry-Barnabé, 1951*)

-Nord et Est : Réception et Préparation de la laine à partir de la route de Tours (lavage, triage et battage)

-Centre : Grands ateliers tels que filature et tissage ainsi que l'horloge permettant de distribuer l'énergie dans toutes les directions avec rapidité et efficacité.

-Ouest : Ateliers de finissage

-Sud : Stockage, emballage et ensuite expédition

Des voies de desserte intérieures assuraient la jonction entre les différentes entités composant la manufacture. Un principe qui fut innovant à cette époque. (*Méry-Barnabé, 1951*)

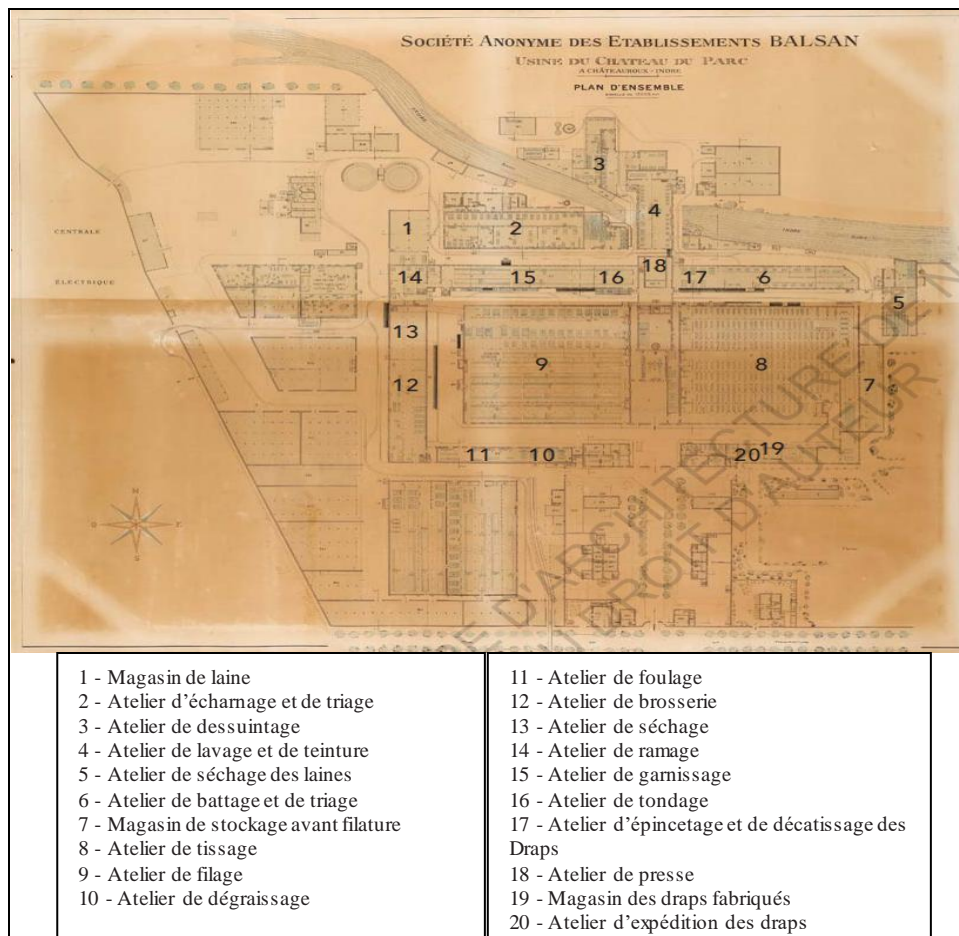


Figure 80 : Schéma fonctionnel de l'usine de Balsan, source : *Traitement personnel*

L'usine de Jean Pierre Balsan et sa conjointe subissait plusieurs altérations dans sa composition à travers le temps suivant l'évolution de leur composition familiale ainsi que les performances de la manufacture, faisant de cet équipement un exemple typique de la transformation évolutive des infrastructures architecturales. En effet, la manufacture eut marqué par la construction de deux châteaux, château rivières et château tours, afin de loger le couple et leurs enfants, l'intégration d'une cité ouvrière comportant toutes les commodités allant jusqu'à la construction d'écoles sous l'égide des autorités locales, ainsi que des terrains agricoles qui serviront au pâturage des moutons. Ces derniers constitueront une source importante pour l'usine Balsan, qui exploitera leur laine évitant ainsi les dépenses d'importation et qui en outre serviront de nourriture d'une source alimentaire pour la cité ouvrière. (Méry-Barnabé, 1951)

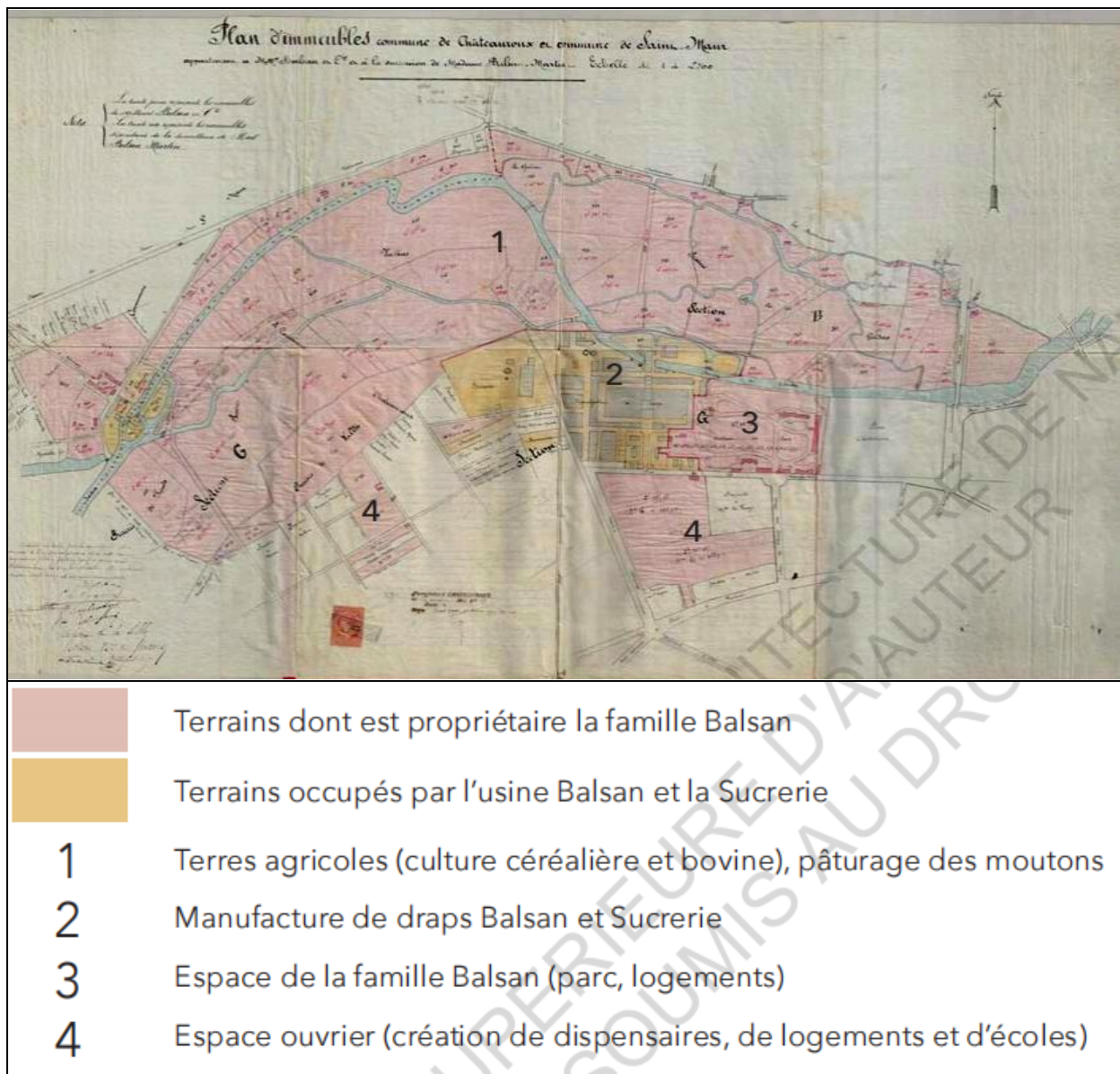


Figure 81 : Schéma démontrant les différents compartiments composant l'usine de Balsan, source : *amsi-balsan-asso.fr*

La structure de l'usine repose sur une ossature rigide. Elle est adoptée dans la perspective d'adaptation aux éventuels transformations futures. Trois types de matériaux sont utilisés en fonction des charges qu'ils doivent supporter ; la fonte, le bois et le métal. (Méry-Barnabé, 1951)



Figure 82 : Vue sur la structure métallique de l'usine Balsan, source : *bridgemanimages.com*

Une toiture en sheds fut implantée au-dessus des ateliers, tout au long du processus de fabrication permettant une pénétration accrue de la lumière naturelle sur toutes les parties de ceux-ci. (Méry-Barnabé, 1951)



Figure 83 : Vue sur les ateliers montrant la pénétration de la lumière naturelle à travers des systèmes de sheds dans l'usine Balsan, source : *bridgemanimages.com*

7.1.3. Aspect énergétique :

Dans ses débuts, l'usine s'étayait, pour la production énergétique, sur un système de cogénération conventionnel basé sur la force motrice de l'eau extraite de l'Indre. Avant qu'elle penchât sur la vapeur, marquant ainsi une première modernisation. Peu de temps après l'installation des premières voies ferroviaires, la manufacture bascule vers l'énergie à base du

charbon, stockés dans des caves, qui est désormais facilement transportable. La construction du barrage d'Eguzon, par a suite, avait permis une intégration progressive de l'électricité dans les systèmes de production énergétique jusqu'à adopter un système de couplage. (Méry-Barnabé, 1951).

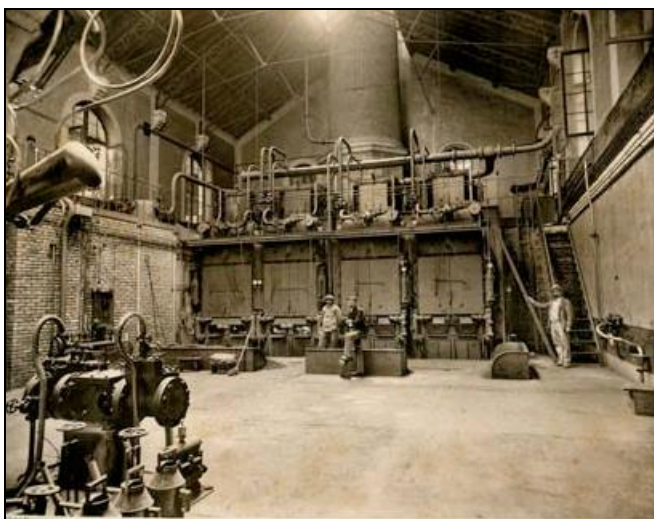


Figure 84 : Vue de la salle des chaudières de l'usine Balsan, source : *bridgemanimages.com*

Quoique la manufacture Balsan fut érigée et inaugurée dans une période où l'exploitation technologique dans le but de produire l'énergie ne fut pas encore de date, à travers le système de cogénération, l'emplacement central des postes transformateurs offrant des répartitions fluides et optimales, l'usine s'est montrée comme un modèle de planification prospective dans l'optique de s'adapter aux possibles fluctuations ultérieures.

7.1.4. Schéma de structure d'organisation d'usine :

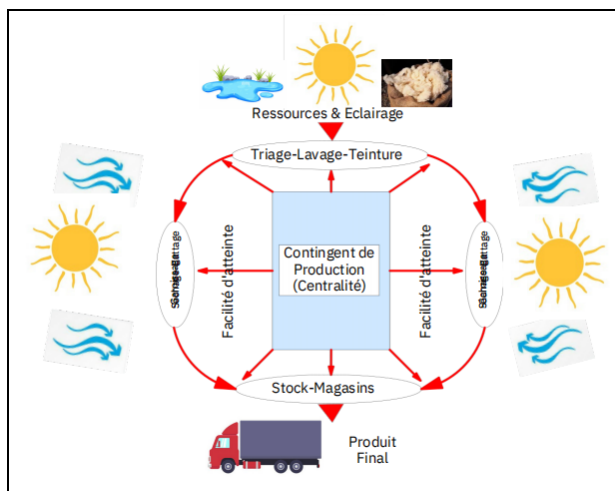


Figure 85 : Schéma démontrant le fonctionnement global de l'usine Balsan, source : *Traitement personnel*

7.2. Analyse de complexe de production de textile ICOTAL :

La manufacture Icotal située à la zone portuaire de Bejaia est fondée en 1959 sur occupant une surface estimée à 100000 m². Affiliée au groupe EATIT, elle constitue un acteur majeur du secteur textile national.

L'usine est un véritable fruit de l'industrie algérienne post-indépendance. Vers 1990, sous l'effet de de la libéralisation du marché et la concurrence étrangère , surtout asiatique, Icotal a connu une décadence considérable dans ses performance, avant qu'elle se relance dans une tentative de reconquête du marché textile local public, vers 2010, en amorçant une stratégie reposant sur la modernisation des équipements et la restructuration des ateliers tout en ciblant une clientèle spécifique, en l'occurrence le marché des sous-vêtements, habilles de travail destinés à l'institution militaire ainsi que les équipementiers sportifs.

7.2.1. Organisation et fonctionnement spatial :

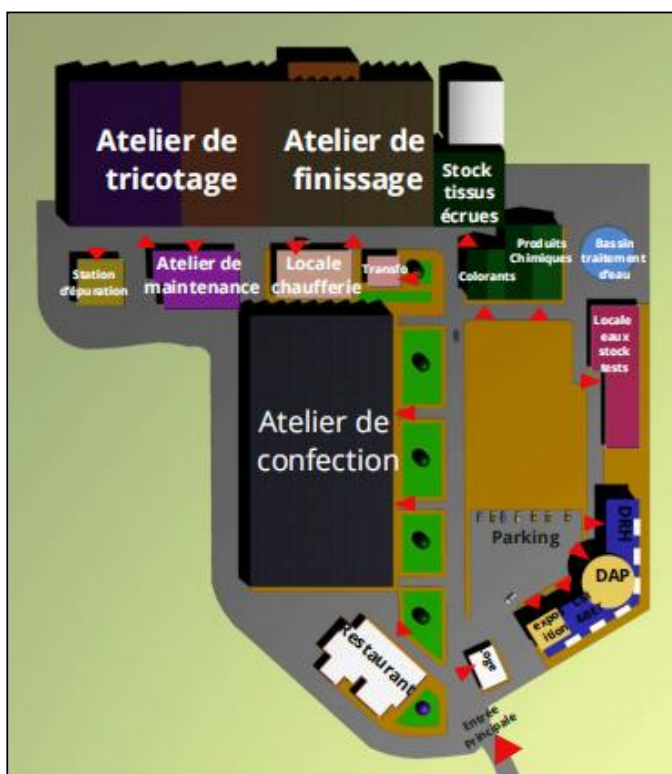


Figure 86 : Plan de masse de l'usine ICOTAL, *source : Carte personnelle*



Figure 87 : Perspective 3D de l'usine ICOTAL, *source : image personnelle*

Magasin de matière première:3450m ² .	Atelier de production de textile:9283 m ² Tricotage:4 756m ² Finissage:4527m ² Teinture:2 375m ² Séchage:2 152m ²	Atelier de confection:6806m ² Découpage:2235m ² Coudrage&Emballage:2290m ² Magasins:1080m ² Bureaux&Vestiaire:337m ² Stockage:864m ²
Magasin de produits finis de 2000m ² .	Services généraux de production:1910m ² Services généraux de soutien:3010m ²	Atelier de Maintenance:723m ² Locaux Techniques:2132m ²

Tableau 06 : Programme surfacique de l'usine ICOTAL, *source : Traitement personnel*

Un zonage fonctionnel caractérise la répartition des entités de l'usine. Les entités dédiées à la production, à savoir tricotage, finissage et confection ainsi que les sous entités qui leurs sont subordonnées à l'image de la maintenance, l'espace d'épuration, la chaufferie et le poste transformateur sont orientés vers le côté Nord, ouest et sud afin qu'ils bénéficient d'un degré maximal de lumière naturelle permettant d'optimiser les apports thermiques ainsi que les niveaux de ventilation naturelle. Tandis que les entités contenant des vocations à caractère administratif et de logistique sont implantées dans l'autre contingent de l'usine ne nécessitant pas des consommations énergétiques d'ampleur.

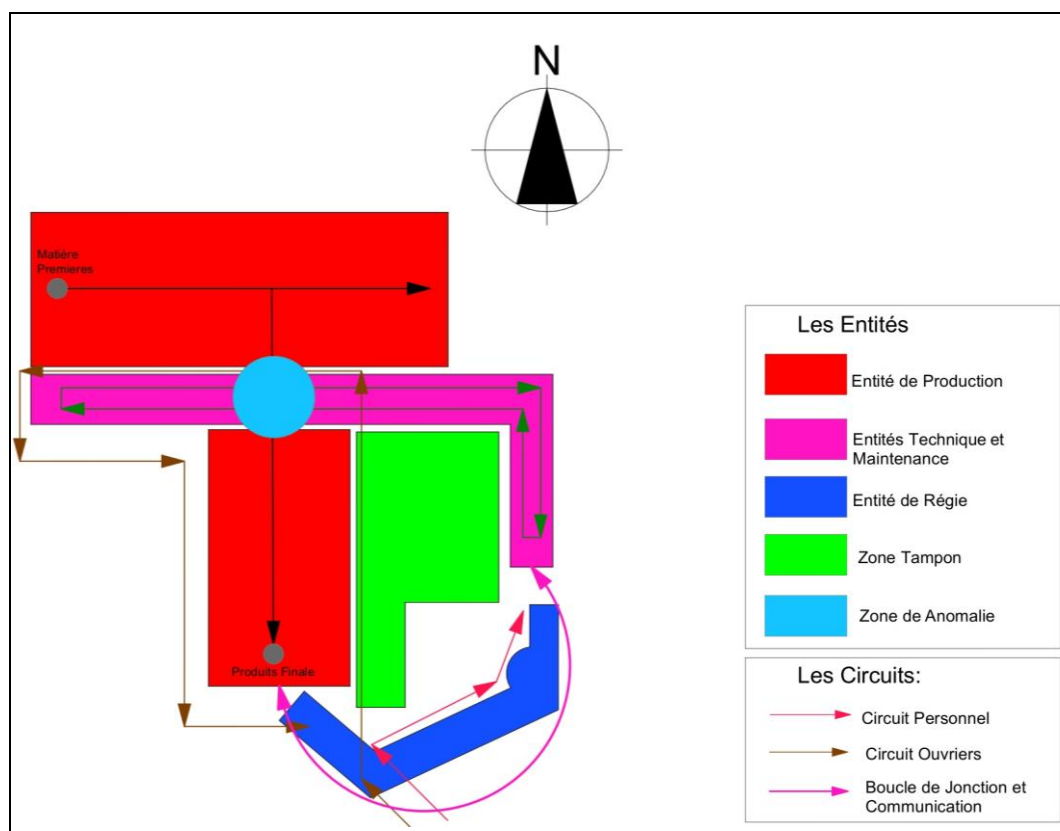


Figure 88 : Schéma démontrant le fonctionnement de l'usine ICOTAL, *source : Traitement personnel*

La circulation est un défi majeur des équipements industriels nécessitant une maîtrise minutieuse dans la gestion des flux de production de logistique ainsi que les flux du personnel et des visiteurs. Au sein d'ICOTAL, on retrouve une ségrégation et séparation assez réussies des circuits du personnel, des ouvriers et de logistique, tandis qu'à travers le flux de production sont palpables quelques lacunes. En effet la continuité du circuit productif est interrompue dans certains nœuds par les circuits techniques et de maintenance, créant ce qu'on appelle des zones

d'anomalie. Une zone tampon est prévue dans l'aménagement de l'usine afin d'assurer la transition entre zone salubre et insalubre.

Zone d'anomalie : Empêchant la fluidité et continuité fonctionnelle/génère des flux débordants

Zone tampon : constitue l'espace purificateur/Assure la ségrégation entre la zone à caractère hygiénique et celle de production.



Figure 89 : image montrant le système structurel et de cloisonnement de l'usine ICOTAL, *source : Photo prise le 08/01/2025*

Système structurelle métallique offrant des ateliers de production a grandes portées, spacieux, aisément reconfigurables selon les besoins.



Figure 90 : image montrant le système de sheds Américain adopté dans l'usine ICOTAL, *source : Photo prise le 08/01/2025*

-Toiture avec un système de sheds américain qui permet un degré optimal de lumière du jour, réduisant la dépendance des ateliers à l'utilisation de l'éclairage artificiel.

-Eclairage artificiel conventionnel pas assez performant.

7.2.2. Matériaux de construction :

Disposant une enveloppe traditionnelle de double cloison en maçonnerie ainsi qu'en utilisant des ouvertures simples non isolantes, Icotat ne détient point de possibilité pour améliorer ses performances énergétiques à travers son enveloppe. Toutefois le système structurel en métal résistant aux charges importantes, facilite le réaménagement au gré des espaces de production.

7.2.3. Aspect énergétique technologique :

La manufacture est dotée d'un système énergétique classique se basant sur le captage du réseau électrique public, et disposant d'un poste transformateur se chargeant de l'alimentation des différentes entités.

Lors de ma visite, qui rentre dans le cadre d'un stage pratique, j'ai effectué quelques entretiens avec le personnel de l'usine. Ceux ont asserté le fait que les rendements productifs de leur entreprise sont en nette régression, foncièrement à cause du système de gestion énergétique défaillant et non compatible avec les équipements de nouvelle génération.

Chapitre VI :

Conclusion générale

VI. Conclusion générale :

Lors des deux siècles écoulés, l'industrie, et plus spécifiquement les complexes industriels de production, constituaient un préjudice majeur envers l'environnement. Les effets funestes qu'engendre ce type d'infrastructures, à cause de la consommation énergétique excessive qu'elles exigent, à l'image de l'épuisement des ressources naturelles, la dégradation progressive de la faune et de la flore, le réchauffement climatique ainsi que ces innombrables méfaits sur le plan social, ont entièrement dissimulés ses bienfaits économiques sur la société. De ce fait, à travers cette recherche, nous avons initiés une quête d'alternatives et de solutions, qui permettront aux complexes de production industriels d'assouvir leurs besoins énergétiques, tout en gardant une empreinte écologique neutre.

L'architecture, étant la base de toute organisation sociale, fût le sujet central autour de laquelle s'est développée notre réflexion. L'importance que revête ce domaine est souvent sous-estimée. En effet, la réussite et la déchéance de tout projet industriel est subordonnée à l'efficacité du mécanisme architectural qui le régit. Ce fait est affirmé, lors de notre recherche, en entrevoyant les différents prototypes qu'on a eu l'occasion d'analyser. En effet, ces exemples démontrent que les degrés de confort et même d'efficacité dans le procédé productif vont parallèlement avec le degré d'efficacité et de raffinement de la conception architecturale. Pour cela, nous nous sommes consentis à dévouer la plus grande part de nos efforts à retrouver le mécanisme architectural adéquat pour assurer la conception d'infrastructures industrielles écoresponsables, durables et à métabolisme énergétique bénin. Après une recherche documentaire colossale, le choix s'est porté sur l'architecture évolutive. Le choix n'est guère anodin ni aléatoire. En effet, l'architecture évolutive s'avère très propice à la prospérité des complexes de production industriels. Dès le choix d'implantation jusqu'au choix de revêtements, en passant par les démarcations intérieures des espaces, ce type d'architecture intervient dans toutes les phases d'insertion d'un projet dans quelque contexte, en allant jusqu'à la conception prédictive à travers le temps. Parallèlement aux infrastructures industrielles qui sont caractérisées par les changements imminents qui interviennent dans ses besoins et exigences, l'architecture évolutive, donc, se présente comme le remède le plus optimal pour assurer l'adaptativité, la pérennité et le contrôle du sort d'un complexe industriel. L'architecture évolutive dispose en son arsenal une large gamme de dispositifs et de dispositions conceptuelles qui contribuent

positivement à assurer l'optimisation des consommations énergétiques au sein d'un complexe de production en améliorant les degrés du confort en son sein, et en assurant la flexibilité du bâti face à toute fluctuations dans les besoins, qu'elles soient d'ordre spatial, sociale ou bien relative à la responsivité envers les évolutions technologiques.

De là, on rentre dans la deuxième catégorie de solutions proposés. A savoir bénéficier de l'essor technologique accru afin de concevoir des infrastructures entièrement régies par des systèmes intelligents. En effet, le développement technologique allant à grand galop permet de prévoir des solutions de plus en plus innovantes dans l'objectif de gérer et d'optimiser les consommations énergétiques au sein des complexes de production industriels. Chose vers laquelle s'est penché un nombre important d'infrastructure industrielles moderne à travers le monde. En adoptant tantôt des systèmes à gestion prédictive, tantôt des systèmes à mécanisme correctif en temps réel, les complexes industriels accentuent leur responsivité face aux fluctuations du marché et se préservent de tout péril guettant leur pérennité concurrentielle. Or, au cours de la recherche, on rencontre souvent des enseignements indiquant, pour des motifs foncièrement économiques, que les complexes industriels Algériens s'affichent réticents quant à l'incorporation des systèmes innovants dans la gestion de leurs infrastructures, se contentant d'une intégration minimaliste touchant principalement le processus productif. Néanmoins, les stages effectués au sein de complexes de renommée au niveau national, nous ont enseigné que non seulement le recours minimaliste à ces technologies avancées est imputable à des raisons économiques, mais il résulte également d'un manque flagrant d'une main d'œuvre qualifiée capable de les manier à long terme. En effet, quoique l'incorporation des technologies avancées à l'image des capteurs IoT, de la blockchain et de l'intelligence artificielle, peut s'avérer relativement onéreuse à court terme, or, les résultats qu'elle engendrent à long terme sur les consommations énergétiques des infrastructures industrielles garantissent une indemnisation et un profit assuré ; et les exemples à prouver ce fait sont multiples.

Dès lors, la conciliation d'un style architectural résilient, durable et évolutif avec une intégration profonde de technologies intelligentes, qui lui est parfaitement compatible, est le chemin à arpenter volontiers actuellement afin d'assurer des infrastructures à la fois pérennes et écoresponsables. Un changement imminent des pratiques industrielles est plus que jamais un

sujet d'actualité ; préserver l'environnement est notre responsabilité ; adopter une mentalité proactive est nécessaire.

Chapitre VII :

Annexe

1. Projet de fin d'étude :

1.1. Stratégie de conception :

La phase d'idéation et de programmation constitue une phase cruciale pour assurer l'insertion optimale de tout projet dans son environnement immédiat. Pour cela, et suite aux enseignements tirés dans les parties précédentes de la recherche, on a procédé à la mise en œuvre d'une stratégie à plusieurs échelons garantissant la réussite du prototype à proposer.

La première étape effectuée se relate au respect des règles et des normes d'urbanisme en vigueur. Après avoir détecté les axes routiers et matérialiser leurs alignements respectifs, on est parvenu à délimiter l'assiette d'intervention exploitable.



Figure 91 : Carte montrant la stratégie urbanistique réglementaire adoptée, *source : Traitement personnel avec le logiciel Autocad*

La deuxième étape après détection de la nature des bâtisses ainsi que leurs vocations fut la distinction de la parcelle destinée au projet en deux compartiments disparates : un contingent insalubre orienté vers la zone industrielle avoisinante et une partie salubre à donnant sur les immeubles d'habitations à proximité. Afin d'éviter le contact abrupt entre ces deux zones, on a pris la résolution d'atténuer la confrontation à travers la création de zones intermédiaire purifiante : des zones tampons.

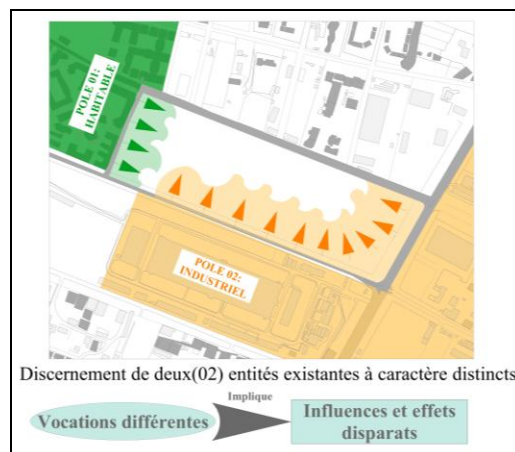
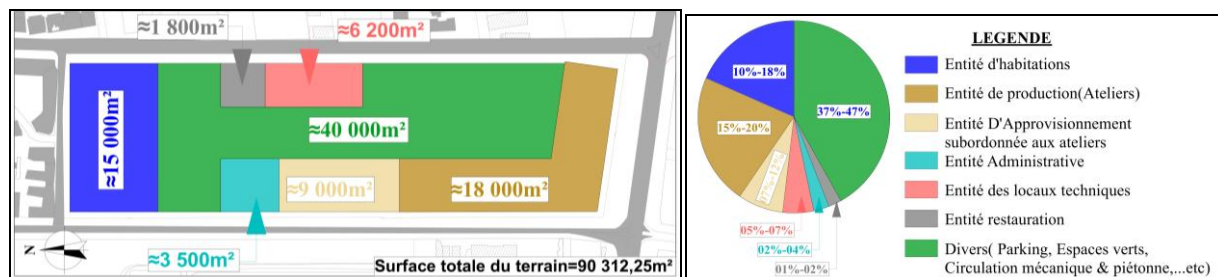


Figure 92 : Carte montrant la stratégie de ségrégation adoptée, *source : Traitement personnel avec le logiciel Autocad*

Ensuite, en se basant sur les recherches et les analyses effectuées, on s'est mis à la préparation d'un préprogramme surfacique englobant l'ensemble des entités à prévoir au sein du projet. Afin de garantir une cohérence dans l'insertion des différentes entités dans l'assiette d'intervention, on a eu recours au principe d'homothétie afin d'affecter les surfaces propres à chaque entité, ceci en se basant sur les programmes surfaciques étudiés précédemment, et en établissant des ratios d'occupation par rapport aux surfaces de terrains inhérentes à chaque projet.



Figures 93 et 94 : Carte et diagramme montrant la stratégie d'homothétie adoptée, source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD

1.2. Entité de production :

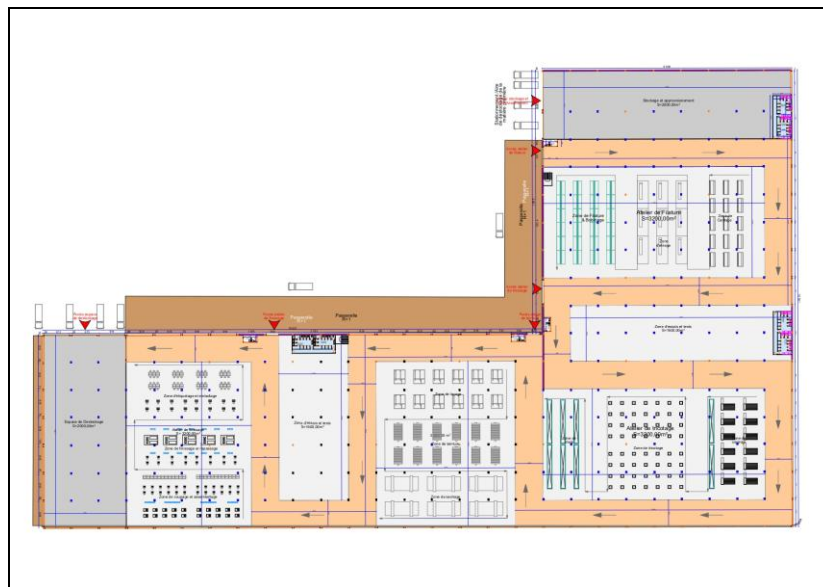
L'entité de production comprenant l'ensemble des ateliers destinés à la production de textile (choix fondé sur des facteurs économiques relatif à l'industrie locale de la wilaya de Bejaia), occupe une partie une surface d'environ 20% de la surface totale du terrain. Vu l'envergure de cette entité, on s'est consenti à la prendre à part afin de bien énumérer les principes de conception adoptés dans le projet.

À l'issu des enseignements tirés des parties théoriques de cette recherche, on a pris la décision d'incorporer des éléments relatifs à l'architecture évolutive dans sa conception. Ces dispositifs et dispositions permettent d'octroyer au projet une résilience accrue et contribuent activement à l'optimisation du confort au sein du lieu de travail et des consommations énergétiques.

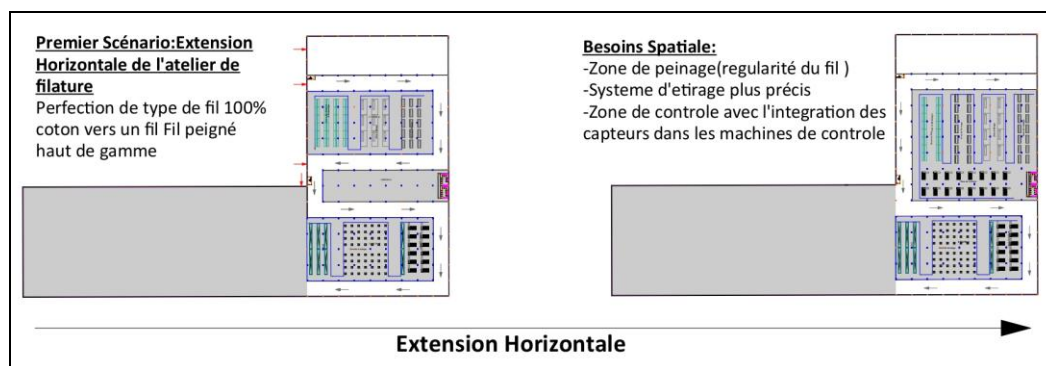
Le principe d'homothétie est encore une fois exploité afin de déterminer les surfaces à octroyer pour chaque atelier de production. Ensuite, le choix de la structure appropriée s'est porté sur une structure métallique modulable. Présentant des trames régulières et des espaces vastes à aménager au gré de l'utilisateur, horizontalement et verticalement, elle constitue l'ossature propice à une activité industrielle optimisée.

Ensuite, on a intercalé des aires multi vocationnelles entre chaque deux ateliers ; celles-ci offrent une possibilité aux ateliers de s'étendre en cas du besoin sans recourir à opérations superflues. En outre, un parcours sinueux, présentant des avantages innombrables quant à la gestion des flux de production, fut adopté.

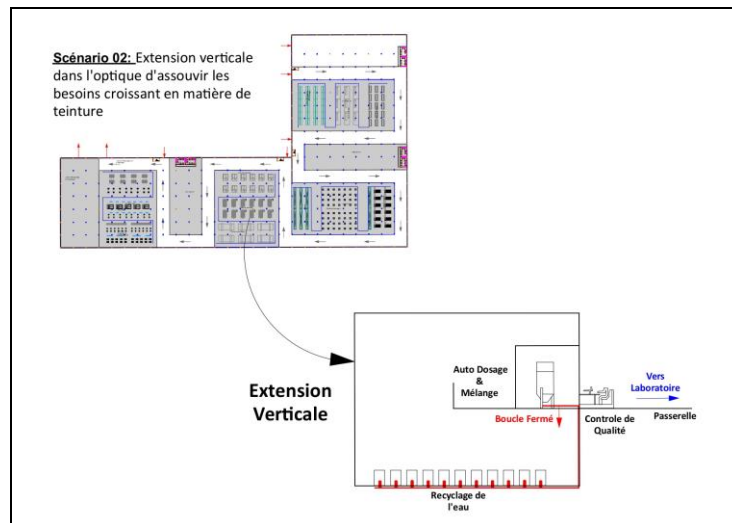
Le résultat obtenu est une entité de production entièrement résiliente, flexible et adaptative vis-à-vis des altérations constantes des besoins du complexe. En ce qui suit, deux scénarios de réaménagement de l'entité de production en fonction de l'évolution des besoins.



Figures 95 : Plan d'aménagement du rez de chaussée de l'entité de production, *source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD*



Figures 96 : Scénario de réaménagement n°01 préposant une extension horizontale, *source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD*

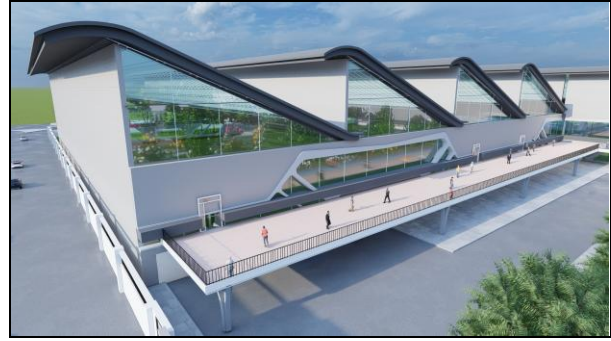


Figures 97 : Scénario de réaménagement n°02 préposant une extension verticale, *source : Traitement personnel avec le logiciel ArchiCAD*

1.3. Synthèse du projet :

En ce qui suit, des images de synthèse du projet, obtenues après modélisation 3D par le biais des logiciels ArchiCAD et Lumion.





Figures 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104 et 105 : Images synthèses 3D du projet, *source : Traitement personnel avec le logiciel Lumion*

1.4. Simulation énergétique du projet par ArchiWizard :

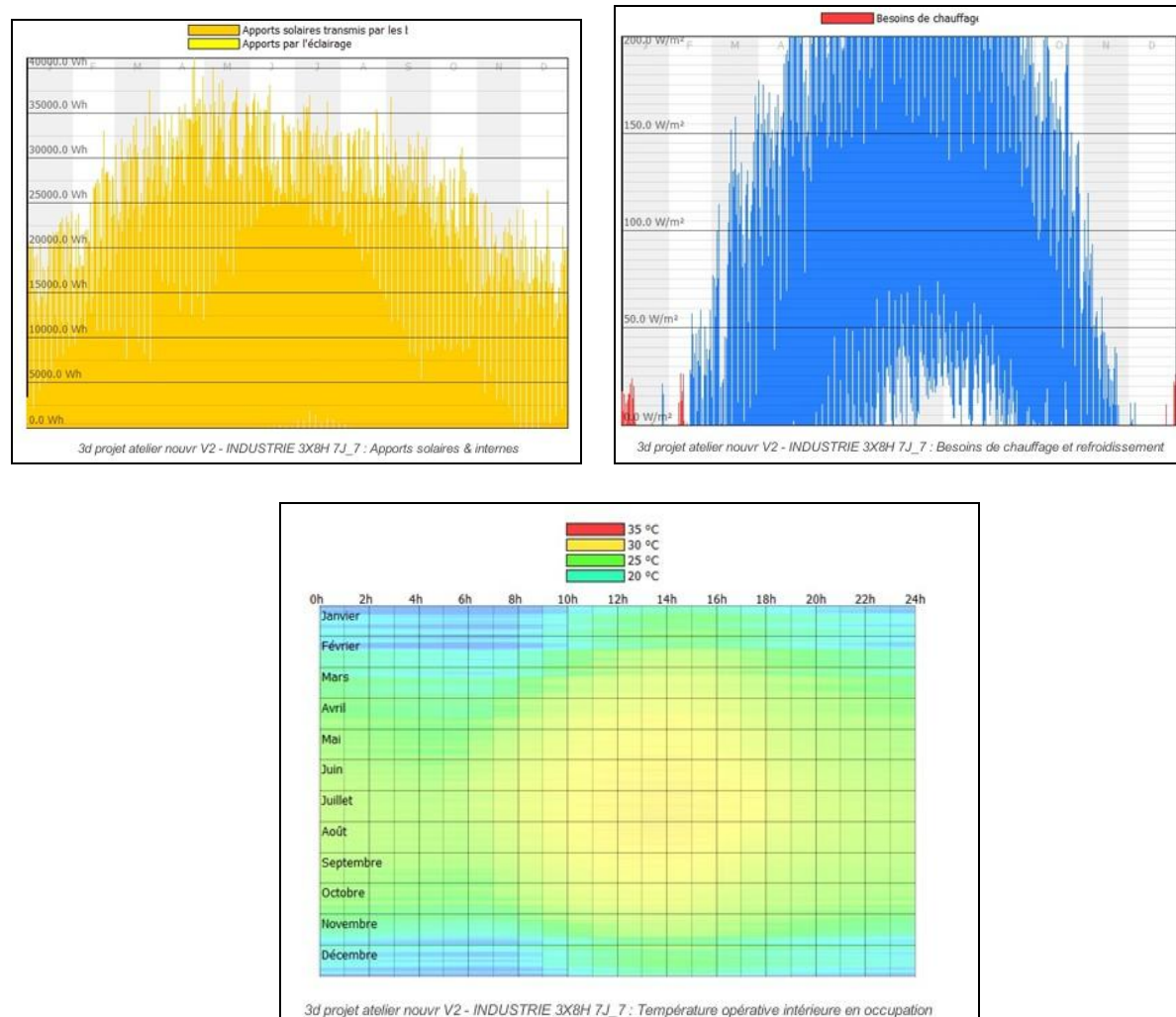
À l'issue de la conception, et afin d'évaluer l'efficacité des solutions apportées pour assurer la consommation énergétique optimale du projet, on a effectué une simulation énergétique de celui-ci par le biais du logiciel ArchiWizard. Afin d'obtenir des résultats plus pertinents, on s'est consentis, comme fut le cas dans la partie précédente, de ne prendre en échantillon que la partie la plus importante du projet, en l'occurrence celle qui est réservée à la production.

1.4.1. Méthodologie :

La simulation est fondée sur des hypothèses, qui de leur côté, s'étaye sur les attributs géométrique et constructif propre au bâtiment, les conditions climatiques qui caractérisent le contexte local (Wilaya de Bejaia) ainsi qu'un scénario d'occupation industrielle selon un fonctionnement en continu. Afin d'assurer une simulation pertinente, les éléments constructifs furent configurés en fonction de leur position, ainsi qu'en addition aux charges internes, on a incorporé les apports solaires.

1.4.2. Résultats :

Les résultats de la simulation sont démontrés en ce qui suit :

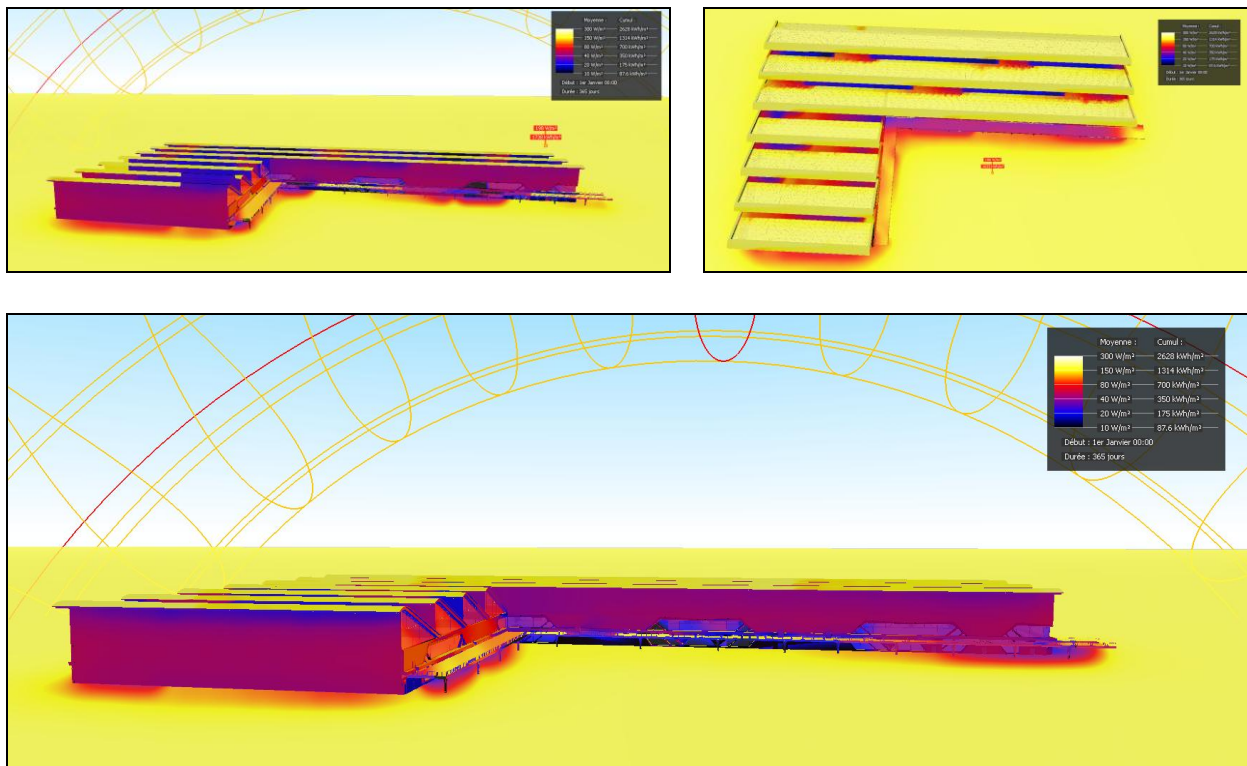


Figures 106, 107 et 108 : Résultats relatifs à la simulation des besoins de chauffage et de refroidissement, des apports solaires et des températures opératives au sein du projet, source : *Traitement personnel avec le logiciel ArchiWizard*

Les résultats révèlent des températures opératives minimales de 14°C (31 décembre à 6h) des températures opératives maximales de 28°C (16 Juillet à 14h), un nombre d'heures au-dessus de 28°C égale à 1955 heures ainsi qu'un taux d'inconfort thermique aux alentours de 13%. Ces données indiquent des périodes rétrécis dans lesquels le seuil du confort thermique n'est pas atteint, notamment en milieu de journée durant les mois chauds.

Les résultats relatifs aux besoins énergétiques (chauffage et refroidissement) divulguent un besoin de refroidissement plus important que les besoins de chauffage, à cause des apports

solaires importants provenant des toitures ainsi que les apports internes engendrés principalement par le régime d'occupation continu.



Figures 109, 110 et 111 : Résultats relatifs à la simulation thermique des façades du projet, source : *Traitement personnel avec le logiciel ArchiWizard*

Les résultats de celle-ci révèlent une efficacité relativement optimale de l'isolation au niveau des façades. Ce qui implique l'implantation ainsi que l'orientation réussie de l'entité de production. Ces résultats positifs divulguent une certaine indépendance et un recours moindre aux systèmes de régulation thermique du projet en question, ce qui représente un avantage majeur.

Les résultats ont, en outre, révélés le degré d'exposition relativement élevé auquel sont soumises les toitures en sheds de l'entité. Néanmoins, cette dernière constatation représente un potentiel accru pour l'incorporation de panneaux photovoltaïques au niveau des toitures, contribuant à l'autarcie énergétique du projet.

1.4.3. Recommandations :

Les résultats de la simulation thermique indiquent un besoin de rationalisation des apports internes, un besoin de renforcement de l'inertie thermique des parois extérieurs, ainsi qu'une consolidation de la protection solaire (par des brise-soleils), notamment au niveau des toitures.

VIII. Bibliographie :

- (ADEME), A. d. (2022). *Hydrogène bas carbone et renouvelable : état des lieux et perspectives*. ADEME.
- (BMWK), F. M. (s.d). *Our energy transition for an energy supply that is secure, clean, and affordable*. Récupéré sur <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Dossier/energy-transition.html>
- (IEA), I. E. (2020). *Energy Technology Perspectives*. OECD/IEA.
- (IEA), I. E. (2021). *Smart Buildings: A Key for Smart Cities*. Paris, France: IEA Publications.
- (IEA), I. E. (2021). *Smart Industry for a Smart Energy Future*. Paris, France: IEA Publications.
- (UNEP), U. N. (2019). *Global environment outlook – GEO-6: Healthy planet, healthy people*. Cambridge, Royaume Unis: Cambridge University Press.
- (UNIDO), U. N. (2020). *Industrial development report 2020: Industrializing in the digital age*. Vienne, Autriche: UNIDO.
- Abdellah, U. S. (2025, Mars 06). Facteurs de localisation industrielle. Fès, Maroc.
- Abdullah Al Masri, A. N. (2025, Avril 21). *Comparative Analysis of Energy Efficiency in Conventional, Modular, and 3D-Printing Construction Using Building Information Modeling and Multi-Criteria Decision-Making*. Récupéré sur MDPI: <https://www.mdpi.com/2079-3197/12/12/247>
- ADEME. (2022). *L'industrie au cœur de la transition énergétique*. Agence de la transition écologique.
- Archdaily. (2025, Mars 07). *FUTURE STITCH Smart Factory / AZL Architects*. Récupéré sur archdaily: <https://www.archdaily.com/915654/future-stitch-smart-factory-azl-architects>
- ArchDaily. (2025, Mars 07). *Trumpf Smart Factory Chicago / Barkow Leibinger*. Récupéré sur ArchDaily: <https://www.archdaily.com/879572/trumpf-smart-factory-chicago-barkow-leibinger>
- Architecture), P. (. (2015). *Architecture évolutive / flexible*. Paris, France: Plan Urbanisme Construction Architecture.
- Architecture), P. (. (2020). *L'habitat de demain : entre transitions et innovations*. Paris, France: Ministère de la Transition écologique et solidaire / Plan Urbanisme Construction Architecture.
- Association), C. (. (2015). *Intelligent Buildings and Smart Cities: A Market Overview*. Ottawa, Canada: CABA.
- Association), C. (. (2015). *Intelligent Buildings and Smart Cities: A Market Overview*. Ottawa, Canada: CABA.
- Association), C. (. (2020). *Connected Homes and Intelligent Buildings: 2020 Market Overview*. Ottawa, Canada: CABA.
- BIP Statistical Review. (2017). BIP Statistical Review of world energy 2017. (B. S. Review, Éd.) *BIP Statistical Review of world energy 2017*. Consulté le 11 27, 2024, sur <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>

- Bordas, A. M. (2021). *Architecture évolutive / réversible - Formes et dispositifs*. Rennes, France.
- BOSCH. (2025, Mars 07). *Bosch, leader de l'industrie 4.0, partenaire de l'Usine Extraordinaire pour « changer d'idée sur l'usine »*. Récupéré sur BOSCH: <https://www.bosch.fr/actualites-et-stories/usine-extraordinaire/>
- Buckman, A. H. (2014). *What is a smart building? Energy and Buildings*.
- Capehart, B. L. (2020). *Guide to Energy Management (8^e éd.)*. Paris, France: Fairmont Press.
- Capehart, B. L. (2020). *Guide to Energy Management (8^e éd.)*. Paris, France: Fairmont press.
- Castells, M. (1996). *The Rise of the Network Society*. Oxford, Angletterre: Blackwell.
- Chandler, A. D. (1990). *Scale and Scope: The Dynamics of Industrial Capitalism*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Commission Européenne. (2019). *Le pacte vert pour l'Europe*. Bruxelles.
- Corbusier, L. (1923). *Vers une architecture*. Paris, France: Éditions Crès.
- Corporation, U. T. (1984). *Case study: The first intelligent building in Hartford, Connecticut*. Hartford, CT: UTC Press.
- Dafeng Zhu, Y. B. (2022). *Energy Management Based on Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for A Multi-Energy Industrial Park*. arXiv.
- Delhay, S. (2025, Février 25). *Projet: LONA 2008*. Récupéré sur Sophie Delhay architecte: sophie-delhay-architecte.fr
- Design Builder. (2025, Avril 03). *Optimisation*. Récupéré sur Design Builder: <https://designbuilder.co.uk/optimisation?utm>
- Development, T. I. (2021). *The International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. Séoul, Corée de sud: Korean Institute of Ecological Architecture and Environment.
- Durand, J.-P. (2019). *Sociologie du travail*. Paris: Armand Colin.
- Duvoux, N. (2012). *Les nouvelles figures de la philanthropie*. Paris, France: Presses Universitaires de France (PUF).
- écologique), A. (. (2021). *Optimisation des consommations énergétiques en milieu industriel*. ADEME.
- Emma, L. (2025, février 01). *Enterprise Resource Planning (ERP) Systems for Streamlining Organizational Processes*. Récupéré sur ResearchGate.
- Energy & Buildings Journal. (2021). *Smart building technologies for energy efficiency improvements*. Energy & Buildings.
- Energy, U. D. (2021). *U.S. Department of Energy*. New York, Etats-Unis: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.
- Engel, H. (1985). *The Japanese House: A Tradition for Contemporary Architecture*. New York, Etats-Unis: Van Nostrand Reinhold.

VIII. Bibliographie

- Fleury, M. (2021). *Espaces-temps : entre hier et aujourd'hui, l'habitat évolutif pour demain*(Mémoire de fin d'études, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes). Sous la direction de Christian Marenne et Virginie Meunier. Nantes, France.
- Ford, H. (1922). *My Life and Work*. New York: Garden City Publishing.
- Friedmann, G. (1956). *Le travail en miettes*. Paris: Gallimard.
- GlobalTradeMag. (2025, février 01). *Role of ERP software in manufacturing industry*.
- Gueslin, A. (1998). *L'invention de la philanthropie: Approche historique et sociologique*. Paris, France: La Découverte.
- Guichard, L. (2000). *Géographie industrielle*. Paris: Armand Colin.
- Habraken, N. J. (1998). *The Structure of the Ordinary: Form and Control in the Built Environment*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Halliday, D. R. (2014). *Fundamentals of Physics (10th ed.)*. Wiley.
- Hermann, M. P. (2016). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review*. Procedia CIRP.
- Hermann, M. P. (s.d.). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review*. Procedia CIRP.
- IEA (International Energy Agency). (2023). *World Energy Outlook 2023*.
- Industrial Revolution*. (2025, janvier 15). Récupéré sur Encyclopaedia Britannica.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *CO2 Emissions in 2022*.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*.
- Jaurès, U. T. (2025, Mars 06). *Facteurs de localisation industrielle : cours de géographie économique*. Toulouse, France.
- Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire. (2025, Janvier 14). *Loi n° 04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable*. Récupéré sur Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire: <http://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2004/F2004045.pdf>
- Journal, A. (s.d). *Architectural Journal*. Londres, Angleterre: Royal Institute of British Architects (RIBA).
- Koshta, H. A. (2025, Mars 07). *Trumpf Hungary Smart Factory / Barkow Leibinger*. Récupéré sur ArchDaily: https://www.archdaily.com/1024705/trumpf-hungary-smart-factory-barkow-leibinger?utm_
- Kronenburg, R. (2007). *Flexible: Architecture that Responds to Change*. Londres, Angleterre: Laurence King Publishing.
- Krugman, P. (1991). *Geography and Trade*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Krugman, P. O. (2018). *International economics: Theory and policy (11th ed.)*. Harlow, Angleterre: Pearson Education Limited.

- l'Office québécois de la langue française (OQLF). (2025, Janvier 14). *Grand dictionnaire terminologique (GDT)*. Récupéré sur Vitrine Linguistique: https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/resultats-de-recherche?tx_solr%5Bq%5D=complexe+industriel&tx_solr%5Bfilter%5D%5B0%5D=type_stringM%3AAbdl&tx_solr%5Bfilter%5D%5B1%5D=type_stringM%3Aagdt&tx_solr%5Bfilter%5D%5B2%5D=terme%3A1
- Landes, D. S. (2003). *he Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Letté, M. (2010). « *Science, industrie, État : la grande alliance du XX^e siècle.* » *Revue d'économie industrielle*. OpenEdition/Cairn.
- Lu, Y. (2017). *Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues*. Journal of Industrial Information Integration.
- MDPI. (2021). *Employing IoT devices for monitoring and controlling EMS: A review*. Journal of Electrical Systems.
- Méry-Barnabé, C. (1951). *De la manufacture Royale de draps à l'usine de Balsan*. Châteauroux: les Archives municipales.
- mignerot, v. (17 octobre 2019). L'effondrement inéluctable. Dans V. Mignerot (Éd.), *L'effondrement : inéluctable ? par Vincent Mignerot* (p. 1). Lorient: Université Bretagne Sud. Consulté le 01 18, 2025, sur https://www.youtube.com/watch?v=9ME2gHHEdH8&ab_channel=Universit%C3%A9BretagneSud
- Mokyr, J. (1999). *The British Industrial Revolution: An Economic Perspective*. Westview Press.
- Morice, A. (2025, Février 01). *Planification de l'infrastructure industrielle et sécurité opérationnelle*. Récupéré sur Revue International Journal of Industrial Systems.
- Mouhammed, H. B., & Nacer, D. (2016). *Automatisation d'une station de moulage de sable*. Université Ibn Khaldoun de la Wilaya de Tiaret.
- Mutiu Shola Bakare, A. A. (2025, Avril 29). *A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction*. Récupéré sur SpringerNature Link: <https://arxiv.org/abs/2001.02925?utm>
- Nord France Invest, l. d. (2025, Mars 06). *Facteurs d'implantation industrielle : infrastructures et connectivité logistique.* . Récupéré sur Nord France Invest: <https://www.nordfranceinvest.fr>
- Périanéz, M. (1993). *L'évolutivité dans l'habitat : Concept et applications*. Liège, Belgique: Editions de l'Université de Liège.
- Porter, M. E. (1985). *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: NY: Free Press.
- Safdie, M. (1967). *Habitat 67 [Présentation officielle]*. Montréal, Canada: Exposition Universelle de Montréal.

VIII. Bibliographie

- Schneider Electric. (2025, mars 07). *Schneider Electric smart factory*. Récupéré sur Schneider Electric: <https://www.se.com/fr/fr/work/campaign/smart-factory/>
- Shuangyu, H. (2025, Mars 07). *FUTURE STITCH Smart Factory / AZL Architects*. Récupéré sur ArchDaily: <https://www.archdaily.com/915654/future-stitch-smart-factory-azl-architects>
- Siemens Electronic Works. (2025, Mars 07). *Microgrids for Sustainability*. Récupéré sur Siemens Electronic Works: https://www.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/microgrid.html?acz=1&gad_source=1&gad_campaignid=14644112329&gclid=Cj0KCQjwj dTCBhCLARIsAEu8bpKb4Q_5TrrAeLbeczq4mOPGnCe1ScfmqFlAyRRcSZa3KRn4LmL9bV QaAiJrEALw_wcB
- Slack, N. B.-J. (2019). *Operations management (9th ed.)*. Harlow, Angletterre: Pearson Education Limited.
- Solidaire, M. d. (2020). *Flexibilité des bâtiments ? Pour une architecture évolutive*. Paris, France: Ministère de la Transition Écologique et Solidaire.
- Solidaire., M. d. (2020). *Flexibilité des bâtiments ? Pour une architecture évolutive*. Paris, France: Ministère de la Transition Écologique et Solidaire.
- Stevenson, W. J. (2017). *Operations Management (13th ed.)*. New York: McGraw-Hill Education.
- tous, A. p. (2025, Mars 17). *La résidence du Lac à Bordeaux, prototype d'habitat évolutif conçu par Bruno Mollet*. Récupéré sur Architectes pour tous: <https://www.architectes-pour-tous.fr/>
- Universalis, E. (2025, Mars 10). Définition du terme phialnthropie. Paris, France.
- Wilo & Danfoss. (2025, Avril 15). *White Papers sur la performance énergétique*. Récupéré sur Engennering Tomorrow: <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/our-businesses/heating/knowledge-center/whitepapers/>
- Yadav, G. &. (2020). *Architecture and Security of SCADA Systems: A Review*. arXiv.
- Younici Karima, K. R. (2018, 06 01). PIC DE HUBBERT ET CROISSANCE ECONOIQUE : INFLUENCE DE L'EPUISEMENT DES RESSOURCES SUR L'ACCUMULATION DU CAPITAL. (M. King, Éd.) *ASJP*, 15(01), 175-197. Consulté le 11 25, 2024, sur <https://asjp.cerist.dz/en/article/52340>
- YOUNICI Karima, K. R. (2018). *PIC DE HUBBERT ET CROISSANCE ECONOMIQUE: INFLUENCE DE L'EPUISEMENT DES RESSOURCES SUR L'ACCUMULATION DU CAPITAL*.
- Yusuff, M. (2025, Avril 22). *AI for Demand-Side Energy Management in Industrial Operations*. Récupéré sur ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/387802637_AI_for_Demand-Side_Energy_Management_in_Industrial_Operations